

Diplomarbeit

**Entwicklung von Simulationsmodellen zur Bestimmung
und Bewertung von Instandhaltungsstrategien im Bereich
Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik**

Bearbeitet von:

cand. Dipl. Wirtsch.-Ing. Saskia Rudloff (Matrikelnummer: 52 30 85)

Jena, 2008-02-28

Betreuer:

Prof. Dr. Ingo Demske (FH Jena)

Prof. Dr. Erich Stein (FH Jena)

Prof. Dr. Karsten Lemmer (DLR Braunschweig)

Dipl. Wirtsch.-Ing. Katja Beck (DLR Braunschweig)

Dipl. Ing.Inf. Thomas Böhm (DLR Braunschweig)



Abstract

Auf Grund des zunehmenden Wettbewerbs im Verkehrssektor rückt das Thema der Wirtschaftlichkeit im Schienenverkehr immer mehr in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Es gilt gezielt Kosten zu sparen ohne ein Qualitätsdefizit zu verzeichnen. Nach einer Studie der DB AG bietet vor allem der Bereich Instandhaltung ein erhebliches Einsparungspotential. (DB Netz AG, 2006 S. 2 f.) Dieses Einsparungspotential ist nur mit einer optimalen Instandhaltungsstrategie für die jeweiligen Komponenten und Systeme auszuschöpfen. In der Bestimmung und Bewertung der optimalen Instandhaltung besteht momentan eine unternehmerische Herausforderung, da es bisher wenig konstruktive Entscheidungsmuster für eine Strategieauswahl gibt.

Auf Basis dieser Problemstellung werden Simulationsmodelle bzgl. vorbeugende Instandhaltungsstrategien, für den Bereich der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik, entwickelt, die die komplexen strategiespezifischen Ursachen- Wirkungsbeziehungen quantifizieren. Darauf aufbauend werden die Simulationsmodelle optimiert, mit dem Ziel der Kostenminimierung, bei entsprechender technischer Zuverlässigkeit. Abschließend werden auf Basis dieser Modelle die Instandhaltungskosten der optimierten Strategien für einen Netzabschnitt berechnet und daraus die kostengünstigste Instandhaltungsstrategie bestimmt. Letztendlich dienen die Simulation- bzw. Optimierungsergebnisse zum besseren Verständnis von komplexen Zusammenhängen sowie einer besseren Planungssicherheit der zur Verfügung stehenden Ressourcen.



Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
TABELLENVERZEICHNIS.....	VI
FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	VII
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 ZIEL UND AUFGABENSTELLUNG	1
1.2 AUFBAU DER ARBEIT	2
1.3 BEDEUTUNG DER INSTANDHALTUNG IM EISENBAHNBEREICH.....	4
2 INSTANDHALTUNG: BEGRIFFSDEFINITION UND FUNKTIONALE ABGRENZUNG	7
2.1 INSTANDHALTUNGSMAßNAHMEN.....	7
2.2 GRUNDSTRATEGIEN DER INSTANDHALTUNG	10
2.2.1 <i>Ausfallbedingte Strategie</i>	11
2.2.2 <i>Zeitstrategie</i>	12
2.2.3 <i>Inspektionsstrategie- die Zustandsorientierte Instandhaltung</i>	13
2.3 AUSWAHL DER INSTANDHALTUNGSSTRATEGIE.....	14
2.3.1 <i>Technische Betrachtung</i>	15
2.3.2 <i>Kostenbetrachtung</i>	16
2.3.3 <i>Trend zur Zustandsorientierten Instandhaltung im Maschinen- und Anlagenbau</i>	18
3 INSTANDHALTUNG IN DER EISENBAHNLEIT- UND -SICHERUNGSTECHNIK	19
3.1 BEGRIFFSDEFINITION: EISENBAHNLEIT- UND -SICHERUNGSTECHNIK.....	19
3.2 AKTUELLER STAND DER ENTWICKLUNG: INSTANDHALTUNG DER LST- SYSTEME BEI DER DEUTSCHEN BAHN AG	20
3.3 FESTLEGUNG DES UNTERSUCHUNGSBEREICHES.....	22
3.4 BESCHREIBUNG DER MODELLHAFT ABZUBILDENDEN LST- SYSTEME	23
3.4.1 <i>Gleisfreimeldeanlage</i>	23
3.4.2 <i>Weichenantrieb</i>	26
3.4.3 <i>Signal</i>	28
4 ANYLOGIC® - SYSTEM DYNAMICS ZUR OPTIMIERUNG VON INSTANDHALTUNGSSTRATEGIEN.....	29
4.1 ALLGEMEINES ZU ANYLOGIC® - SYSTEM DYNAMICS	29
4.2 BESCHREIBUNG DER OBJEKTSTRUKTUR.....	30
4.2.1 <i>Analyse grundlegender kausaler Zusammenhänge bei der Deutschen Bahn AG</i>	30
4.2.2 <i>Analyse der Wirkzusammenhänge einer LST- Anlagenkomponente</i>	33
4.2.3 <i>Analyse eines LST- Anlagensystems</i>	38
4.2.4 <i>Analyse eines LST- Netzes</i>	40
4.3 VORGEHENSWEISE ZUR BESTIMMUNG VON OPTIMALEN INSTANDHALTUNGSSTRATEGIEN.....	41
4.4 BESCHREIBUNG MATHEMATISCHER UND PHYSIKALISCHER ZUSAMMENHÄNGE	43
4.4.1 <i>Ausfallwahrscheinlichkeit</i>	43
4.4.2 <i>Überlebenswahrscheinlichkeit/ Zuverlässigkeit</i>	43
4.4.3 <i>Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte</i>	44
4.4.4 <i>Ausfallrate</i>	45
4.4.5 <i>Mittlere Lebensdauer</i>	46
4.4.6 <i>Abnutzungsvorrat</i>	47
4.5 GRUNDLEGENDE ANNAHMEN.....	48
4.5.1 <i>MTBF</i>	48
4.5.2 <i>Abnutzungsvorrat</i>	49
4.5.3 <i>Ausfallrate</i>	53
4.6 SIMULATIONSMODELLE ALS INSTRUMENTE ZUR PLANUNG UND GESTALTUNG VON KOMPLEXEN INSTANDHALTUNGSSYSTEMEN	54
4.6.1 <i>Zeitstrategie</i>	58
4.6.2 <i>Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie: „Inspektion“</i>	59
4.6.3 <i>Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie: „Abnutzungsvorrat“</i>	60
4.6.4 <i>Instandhaltungsmodelle der LST- Systeme im Überblick</i>	63



4.7	SIMULATIONSERGEBNISSE DER AUSGANGSWERTE	65
4.7.1	<i>Modellvergleich am Beispiel der Komponente „Stromquelle“</i>	65
4.7.2	<i>Modellvergleich auf Systemebene</i>	68
4.8	OPTIMIERUNG DER INSTANDHALTUNGSMODELLE	71
4.8.1	<i>Ziel der Optimierung und Optimierungskriterien</i>	71
4.8.2	<i>Optimierungsergebnisse versus Simulationsergebnisse auf Basis der Ausgangswerte</i>	73
4.8.3	<i>Optimale Instandhaltungsstrategie unter Restriktionen auf Netzebene</i>	77
4.9	BEWERTUNG UND DISKUSSION DER MODELLE	82
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	85
	ANHANG	87
	LITERATURVERZEICHNIS	90
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	93



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	3
Abbildung 2: Phasen des Produktlebenszyklus.....	4
Abbildung 3: Erfolgswirtschaftliche Wirkung eines Systemausfalls.....	5
Abbildung 4: Bedeutungsfelder der Instandhaltung.....	6
Abbildung 5: Abnutzungsvorrat im Zeitverlauf.....	7
Abbildung 6: Instandhaltung im Überblick.....	8
Abbildung 7: Hierarchie von Instandhaltungstermini.....	10
Abbildung 8: Beziehungsmatrix der Formalziele	14
Abbildung 9: Fragen zur Strategiewahl	15
Abbildung 10: Kostenverlauf in Abhängigkeit eines steigenden Anteils an IH- Maßnahmen	16
Abbildung 11: Allgemeine Wirkzusammenhänge zwischen Instandhaltung und Qualität.....	17
Abbildung 12: Aufbau eines einfach -isolierten Gleisstromkreises.....	24
Abbildung 13: Prinzipielle Funktionsweise eines Achszählers	25
Abbildung 14: Systemaufbau eines Achszählers „Az LM“ der Firma Alcatel	25
Abbildung 15: Schematische Darstellung einer Weiche.....	26
Abbildung 16: Weichenantrieb der Firma Siemens am Gleis.....	27
Abbildung 17: Ziele von System Dynamics Modellen	29
Abbildung 18: Basiskausaldiagramm: LST- Instandhaltung bei der Deutschen Bahn AG	31
Abbildung 19: Ursachen- Wirkungsbeziehungen einer LST- Komponente	34
Abbildung 20: Basis Schema für die Simulationsmodelle.....	35
Abbildung 21: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®- Funktion des AV	36
Abbildung 22: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®: gesamte IH- Kosten.....	36
Abbildung 23: System bestehend aus Komponenten.....	38
Abbildung 24: Netz bestehend aus Systemen	40
Abbildung 25: Vorgehensweise für Systemoptimierung	42
Abbildung 26: Abnutzungsvorrat der Leuchtdiode mit Instandhaltungsmaßnahmen	52
Abbildung 27: Ausfallrate der Leuchtdiode in Abhängigkeit vom AV und MTBF	53
Abbildung 28: Darstellung des Simulationsablaufs (vereinfacht)	55
Abbildung 29: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®	57
Abbildung 30: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®: "System Achszähler", Inspektionsstrategie.....	63
Abbildung 31: Auszug der Simulation der Zeitstrategie.....	67



Abbildung 32: Auszug aus der Simulation der Inspektionsstrategie	67
Abbildung 33: Auszug aus der Simulation der AV- Strategie	67
Abbildung 34: Modellvergleich- Systemkosten auf Basis der Ausgangswerte	69
Abbildung 35: Modellvergleich- Anzahl der Systemausfälle auf Basis der Ausgangswerte ..	70
Abbildung 36: Modellvergleich- Optimierungsergebnisse der Systemkosten.....	73
Abbildung 37: Prozentuale Kostenersparnisse der LST- Systeme im Vergleich zur Ausgangssituation	74
Abbildung 38: Modellvergleich- Systemausfälle nach Optimierung.....	75
Abbildung 39: Prozentuale Reduzierung der Systemausfälle im Vergleich zur Ausgangssituation	75
Abbildung 40: Netzkosten basierend auf der Zeitstrategie	79
Abbildung 41: Netzkosten basierend auf der AV- Strategie.....	80
Abbildung 42: Personalbedarf im Netz basierend auf der Zeitstrategie	81
Abbildung 43: Personalbedarf im Netz basierend auf der AV- Strategie	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Systeme, Komponenten für die Modellierung und Zuordnung der Abnutzungsparameter.....	22
Tabelle 2: Bedeutende Modell- Elemente in AnyLogic.....	56
Tabelle 3: Optimierungsgrenzen der zu variierenden Parameter	71
Tabelle 4: Zuordnung der Zählvariable n.....	72
Tabelle 5: Wartungsplan für das System Gleisstromkreis- Zeitstrategie.....	76
Tabelle 6: Wartungsplan für das System Gleisstromkreis- AV- Strategie.....	76



Formelzeichen und Abkürzungen

α	Maßstabparameter der Weibullverteilung
β	Formparameter der Weibullverteilung
τ	Lebensdauer
λ	Ausfallrate
AV	Abnutzungsvorrat
ASE	Anschlusseinheit
AZA	Achszählerauswertung
BE	Betrachtungseinheit
BEK	Betriebserscherniskosten
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DB AG	Deutsche Bahn AG
EBA	Eisenbahn- Bundesamt
ESO	Eisenbahnsignalordnung
IH	Instandhaltung
KoRiL	Konzernrichtlinie der Deutschen Bahn AG (892.xxxx)
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LST	(Eisenbahn) Leit- und Sicherungstechnik
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTF	Mean Time To Failures
MTTR	Mean Time To Repair
MW	Modellwochen
SD	System Dynamics (AnyLogic [®])
ZP	Zählpunkt (beim Achszähler)

1 Einführung

1.1 Ziel und Aufgabenstellung

Nach einer Studie der Deutschen Bahn AG, betragen die jährlichen Instandhaltungskosten für das deutsche Schienennetz im Durchschnitt 1,25 - 1,5 Milliarden €. Weiterhin geht aus dieser Untersuchung hervor, dass „[...] erhebliche Kostensenkungen in der Instandhaltung durch individuell angepasste Optimierungsmaßnahmen entlang der gesamten Prozesskette möglich und zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit notwendig sind.“ (DB Netz AG, 2006 S. 2 f.) Besonders im Bereich der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik (LST) kommt der Instandhaltung eine entscheidende Bedeutung zu, da die betreffenden Komponenten und Systeme durch eine lange Lebensdauer gekennzeichnet sind. Somit stellt die Instandhaltung einen wesentlichen Faktor für das Kosten- Nutzenverhältnis des gesamten LST- Systems und des übergeordneten Netzabschnittes dar.

Dieser Diplomarbeit wurde das o. g. Problemfeld zu Grunde gelegt und darauf aufbauend das Ziel, der Entwicklung von Simulationsmodellen zur Bestimmung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien, im Bereich der Eisenbahnleit- und –Sicherungstechnik, formuliert. Dazu gilt es zunächst die Ursachen- und Wirkungsbeziehungen bezüglich des Instandhaltungsprozesses, der verschiedenen LST- Komponenten sowie der entsprechenden Systeme qualitativ darzustellen. Im Anschluss daran sind die grundlegenden strategie- und anlagenspezifischen Zusammenhänge quantitativ unter Verwendung der Software AnyLogic®- System Dynamics modellhaft abzubilden.

Diese verschiedenen Instandhaltungsmodelle sollen anschließend optimiert werden, mit dem Ziel der Kostenminimierung, bei entsprechender technischer Verfügbarkeit. Auf Basis dieser Ergebnisse soll die Bewertung alternativer Instandhaltungsstrategien ermöglicht werden. Im letzten Teil wird, anhand der aufgestellten Simulationsmodelle eine kostenoptimierte Instandhaltungsstrategie für ein bestimmtes Teilnetz definiert. Letztendlich soll mit dieser Diplomarbeit ein Forschungsansatz geschaffen werden, um mit Hilfe von Simulationsmodellen erstmals ein Einsparungspotential zu quantifizieren. Darüber hinaus dienen diese Modelle für zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet, um eine kosteneffiziente Netzbewirtschaftung zu ermöglichen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel unterteilt (vgl. Abbildung 1). In dem ersten Kapitel wird eine kurze Einführung in die Ziel- und Aufgabenstellung (vgl. Kapitel 1.1) gegeben. Nachdem die Bedeutung der Instandhaltung (vgl. Kapitel 0) erläutert wurde, schließt sich daran im zweiten Kapitel die Begriffsdefinition der Instandhaltung an. Hier erfolgt zunächst die Beschreibung der Instandhaltungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.1). Darauf aufbauend werden die drei Grundstrategien der Instandhaltung (vgl. Kapitel 2.2) erläutert und entsprechende Auswahlkriterien auf Basis technischer sowie wirtschaftlicher Bewertungskriterien (vgl. Kapitel 2.3) gegeben. Abschließend wird in dem Kapitel 2.3.3 die aktuelle Trendbewegung, im Bereich Maschinen- und Anlagenbau, zu einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie beschrieben.

Das dritte Kapitel umfasst das Thema Instandhaltung, im Bereich der Eisenbahnleit- und – Sicherungstechnik, speziell bei der Deutschen Bahn AG. Nach einer kurzen Begriffsabgrenzung der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik (vgl. Kapitel 3.1) wird die aktuelle Entwicklung der Instandhaltung in diesem Bereich der DB AG beschrieben (vgl. Kapitel 3.2). Auf Grund der hohen Komplexität ist es notwendig, den Untersuchungsbereich, d.h. die bahnspezifischen Systeme und deren Komponenten abzugrenzen (vgl. Kapitel 3.3). Dies erfolgt in Verbindung mit der Beschreibung der ausgewählten Systeme und Komponenten am Ende des dritten Kapitels (vgl. Kapitel 3.4).

Inhalt des vierten Kapitels ist die Optimierung von Instandhaltungsstrategien mittels Simulationsmodellen. Nach einigen grundlegenden Informationen über die Simulationssoftware *AnyLogic® - System Dynamics* (vgl. Kapitel 4.1), folgt die Beschreibung der Objektstruktur. Für einen Gesamtüberblick sind als erstes die bahnspezifischen komplexen Zusammenhänge des Unternehmensbereichs Instandhaltung mit anderen unternehmensinternen und –externen Bereichen aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.2). In den nächsten Kapiteln (vgl. Kapitel 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4) werden die Ursachen- und Wirkungsbeziehungen innerhalb des Instandhaltungsprozesses auf Komponenten-, System- und Netzebene erläutert. Im Anschluss daran wird in Kapitel 4.3 die Vorgehensweise zur Bestimmung von optimalen Instandhaltungsstrategien dargestellt.

Die Entwicklung von Simulationsmodellen, zur Planung und Gestaltung komplexer Instandhaltungssysteme fordert die Berücksichtigung bzw. Umsetzung bestimmter

mathematischer und physikalischer Zusammenhänge, die im Kapitel 4.4 beschrieben werden. Die zur Modellierung notwendigen Annahmen werden im Kapitel 4.5 dargestellt. Auf Basis der drei verschiedenen Instandhaltungsstrategien sind die Simulationsmodelle, in dem folgenden Kapitel (vgl. Kapitel 4.6) programmtechnisch näher erläutert. Darauf aufbauend werden die Simulationsergebnisse auf Komponentenebene sowie auf Systemebene analysiert, um die grundsätzlichen strategie- und somit modellspezifischen Merkmale zu verdeutlichen (vgl. Kapitel 4.7). Diese Ergebnisse werden den Optimierungsergebnissen im Kapitel 4.8 gegenübergestellt, nachdem das Ziel der Optimierung zusammen mit den spezifischen Optimierungskriterien beschrieben wurde (vgl. Kapitel 4.8.1, 4.8.2). Zum vollständigen Vergleich der Instandhaltungsmodelle, werden die Optimierungsergebnisse der angewandten Instandhaltungsstrategie der Deutschen Bahn AG und einer idealisierten zustandsorientierten Strategie, auf einen bestimmten Netzabschnitt der DB AG übertragen und unter Restriktionen miteinander verglichen. Diese Ergebnisse und Ausführungen werden am Ende des vierten Kapitels nochmals kritisch diskutiert. Daran schließt sich im fünften Kapitel die Zusammenfassung und der Ausblick.

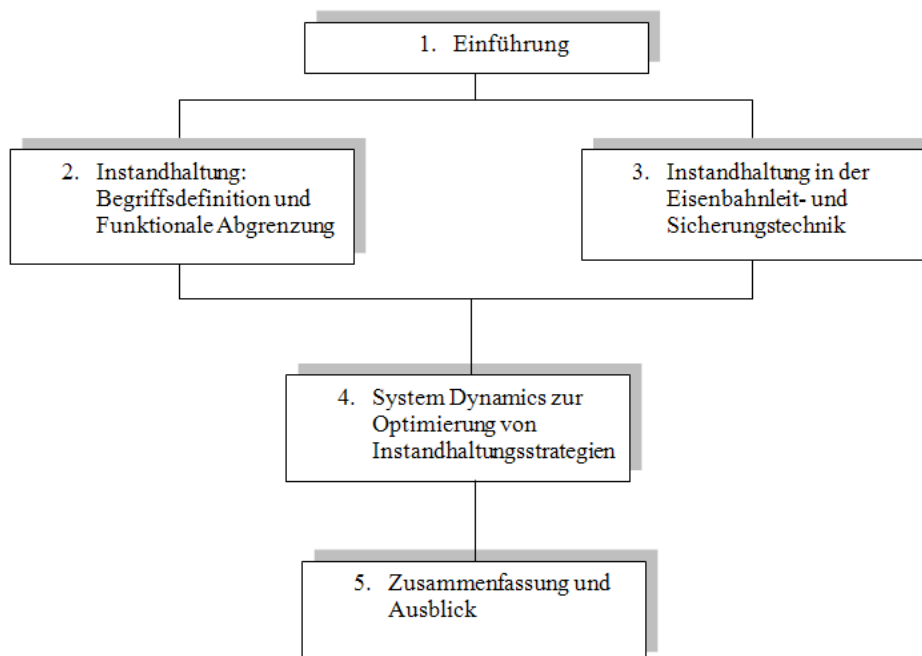


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

1.3 Bedeutung der Instandhaltung im Eisenbahnbereich

Aufgrund des steigenden Wettbewerbs im Verkehrssektor rückt das Thema Wirtschaftlichkeit im Schienenverkehr immer mehr in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Um den aktuellen Kundenstamm im Bahnverkehr auch zukünftig zu halten bzw. auszubauen, sind attraktive Preise im Bereich Transport und Logistik absolut notwendig. Somit gilt es Kosten zu reduzieren ohne dabei ein Qualitätsdefizit zu verzeichnen. Um langfristig effektiv die Gesamtkosten zu verringern ist es absolut notwendig alle Kosten, die während den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus entstehen, angemessen zu berücksichtigen. Nach der DIN EN 60300-3-3 (2005) wird der Produktlebenszyklus in sechs Hauptphasen (vgl. Abbildung 2) eingeteilt.



Abbildung 2: Phasen des Produktlebenszyklus

Quelle: In Anlehnung an (DIN EN 60300-3-3, 2005 S. 7)

Die Lebenszykluskosten (eng. Life Cycle Costs, LCC) können allgemein in Beschaffungskosten, Besitzkosten und Entsorgungskosten eingeteilt werden (vgl. Gl. 1). (DIN EN 60300-3-3, 2005 S. 8)

$$LCC = \text{Kosten}_{\text{Beschaffung}} + \text{Kosten}_{\text{Besitz}} + \text{Kosten}_{\text{Entsorgung}} \quad (1)$$

Der Bahnbereich ist gekennzeichnet durch enorm hohe Investitionen bei Neuanschaffungen und extrem langen Lebensdauern (zwischen 10- 50 Jahren) von Maschinen und Anlagen. Daher tragen neben den Anschaffungskosten auch die Besitzkosten einen überwiegenden Teil der Lebenszykluskosten. Für die Berechnung der Besitzkosten spielen die Instandhaltungskosten eine entscheidende Rolle. (Fleischer, et al., 2007 S. 18)

Ein weiterer Grund für die hohe Bedeutung der Instandhaltung liegt in der Erhaltung bzw. Verbesserung der Funktionsfähigkeit der Anlagen. Mit einer angemessenen Instandhaltungsstrategie können demzufolge Ausfälle und Verspätungen verringert oder vermieden werden. Im Marketing unterscheidet man in Untererfüllung, Erfüllung und Übererfüllung der Kundenerwartungen. Bemerkenswert ist, dass die pünktliche und

fehlerfreie Dienstleistung der Bahn keinerlei Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit hat, da dies als Selbstverständlichkeit vorausgesetzt wird. Im Gegensatz dazu wirken sich Untererfüllungen des Leistungsangebotes (z.B. Verspätungen), sofort negativ auf die Kundenzufriedenheit aus. Diese Untererfüllungen können beispielsweise durch Ausfälle von Systemen der Leit- und -Sicherungstechnik (LST) hervorgerufen werden. (Fleischer, et al., 2007 S. 17) Die folgende Abbildung zeigt einige mögliche erfolgswirtschaftliche Konsequenzen eines Ausfalls für die Deutsche Bahn AG (vgl. Abbildung 3). So können beispielsweise zu häufige Verspätungen auf Grund von Systemausfällen o. ä. einen Nachfragerückgang verursachen, da die Kunden auf Grund mangelnden Vertrauens zur Bahn in dem Individualverkehr abwandern. Verspätungen im Bereich des Güterverkehrs ziehen oftmals kostspielige Konventionalstrafen oder Schadensersatzzahlungen nach sich. Ebenso verursachen Verspätungen im Personenverkehr erhöhte Kosten, in Form von Fahrticketgutschriften oder Hotelübernachtungen o. ä. für betroffene Fahrgäste. Das ist nur ein Auszug möglicher erfolgswirtschaftlicher Auswirkungen, die den Deckungsbeitrag und das Image der DB AG negativ beeinflussen. (Fleischer, et al., 2007 S. 17 ff.)

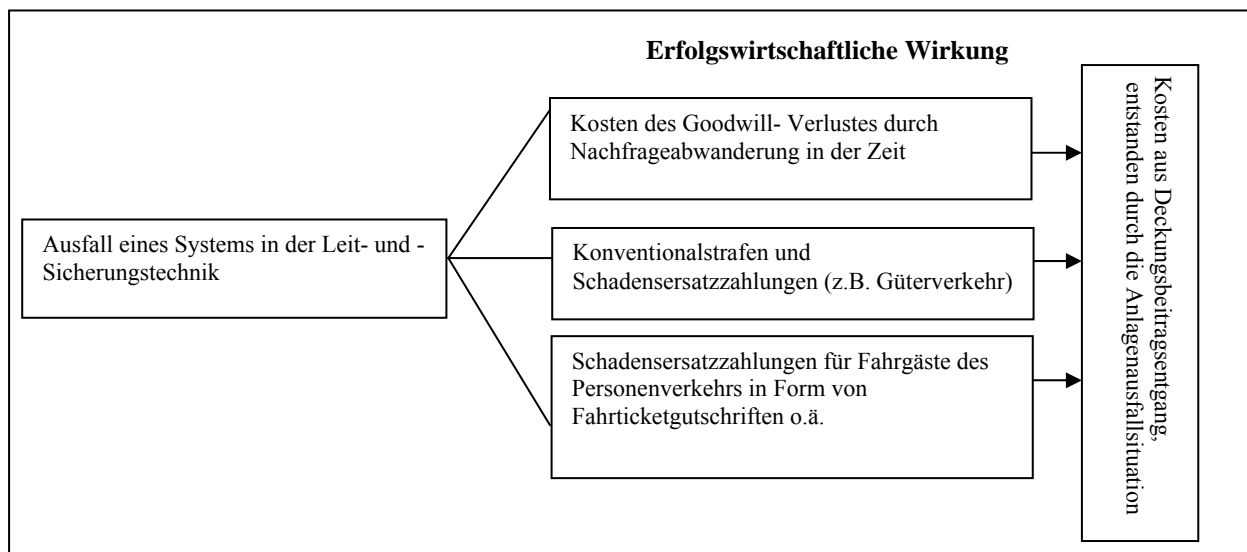


Abbildung 3: Erfolgswirtschaftliche Wirkung eines Systemausfalls

Quelle: In Anlehnung an: (Jandt, 1986 S. 77)

Im Schlimmsten Fall können auch Folgen von Ausfällen Menschenleben gefährden. Um dieses Risiko unbedingt auszuschließen, müssen bestimmte Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, die sich unter anderen auch in der Instandhaltungsstrategie widerspiegeln. (Fleischer, et al., 2007 S. 18)

Letztendlich ist die Instandhaltung als ein unterstützender Prozess zu verstehen, der entscheidend zur Wertschöpfung beiträgt und gleichzeitig ein wichtiger Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit darstellt. Die Abbildung 4 zeigt die wichtigsten Einflussfaktoren der Instandhaltung bei der Deutschen Bahn AG im Überblick. Eine geeignete Instandhaltungsstrategie sichert somit nachhaltig die Funktionsfähigkeit des Systems, das sich wiederum positiv auf die Sicherheit, Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit der gesamten Dienstleistung auswirkt. Da die Lebenszykluskosten zu einem bedeutenden Anteil von der Art, dem Umfang und der Häufigkeit der Instandhaltung abhängig sind, kann eine effektive, d.h. wirtschaftliche sowie technisch angemessene Instandhaltungsstrategie zu einer nachhaltigen Kostenoptimierung bei der Deutschen Bahn AG beitragen. (Signal + Draht (93), 2001 S. 6), (Fleischer, et al., 2007 S. 18)

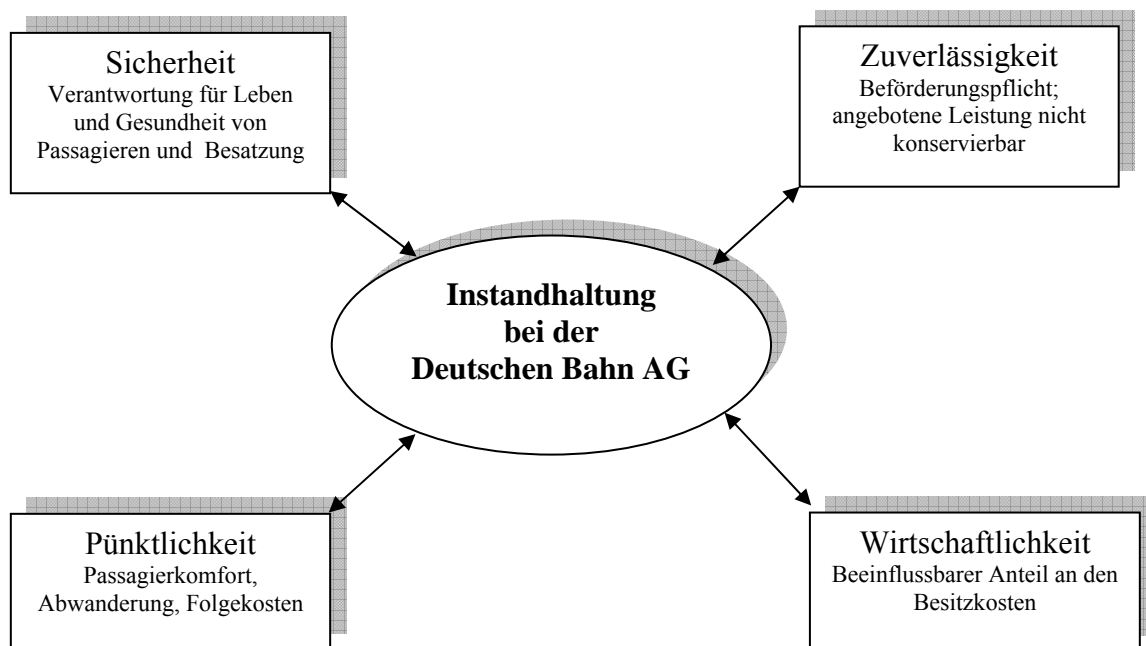


Abbildung 4: Bedeutungsfelder der Instandhaltung

Quelle: In Anlehnung an (Loss, 1996 S. 4)

2 Instandhaltung: Begriffsdefinition und funktionale Abgrenzung

2.1 Instandhaltungsmaßnahmen

Auf Grund der Nutzung einer technischen Komponente während ihres Lebenszyklus treten Zustandsveränderungen auf, die sich negativ auf die Funktionserfüllung auswirken. Diese Zustandsveränderungen werden durch die Höhe des Abnutzungsvorrates beschrieben. Der Abnutzungsvorrat, entspricht nach der DIN 3151: 2003-06, dem Vorrat möglicher „[...] Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen [...]“ einer Betrachtungseinheit¹. Im folgenden Diagramm (vgl. Abbildung 5) ist ein Beispiel einer möglichen Abnutzungskurve dargestellt. Anhand dieses Verlaufs lässt sich erkennen, dass der Abnutzungsvorrat in Abhängigkeit von der Zeit und anderen Abnutzungsparametern abnimmt. Instandhaltungsmaßnahmen (Wartungen, im Diagramm nicht dargestellt) bestimmen den Verlauf des Abnutzungsvorrates. Bei diesem Beispiel wird die BE beim Erreichen einer bestimmten (minimalen) Abnutzungsgrenze ausgetauscht. Diese Maßnahme dient der Rückführung in den Sollzustand, d.h. der Abnutzungsvorrat beträgt nach dieser Instandhaltung annähernd 100% und damit ist diese Betrachtungseinheit wieder voll funktionstüchtig. In Abhängigkeit der Instandhaltungsphilosophie kann eine Neuanschaffung der BE bei einem ganz oder teilweise aufgebrauchten Abnutzungsvorrat vorgenommen werden (EI - Eisenbahningenieur (54), 2003 S. 58).

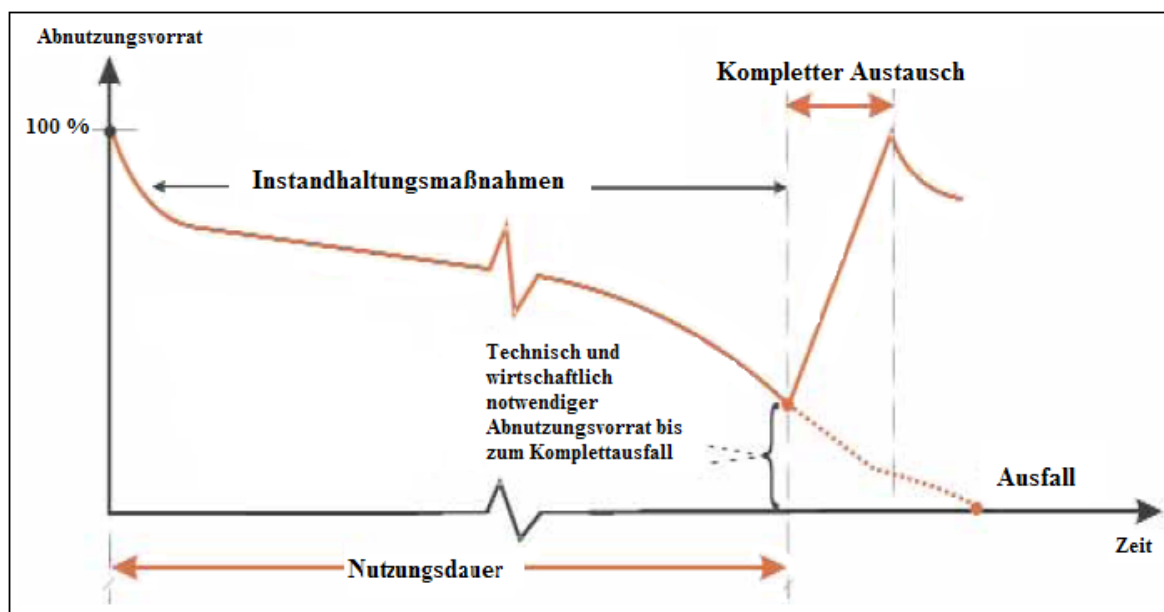


Abbildung 5: Abnutzungsvorrat im Zeitverlauf

Quelle: In Anlehnung an (EI - Eisenbahningenieur (54), 2003 S. 58 f.)

¹ Eine Betrachtungseinheit ist „jedes Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, jede Funktionseinheit, jedes Betriebsmittel oder System, das für sich allein betrachtet werden kann“. (DIN 31051: 2003-06, 2003 S. 5)

Um die vollständige Funktionserfüllung der Komponente über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, sind Instandhaltungsmaßnahmen notwendig, die den Abnutzungsvorrat erhöhen und somit den funktionsfähigen Zustand der Komponente erhalten. Dazu definiert das Deutsche Institut für Normung die Instandhaltung als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit [...]“. (DIN 31051: 2003-06, 2003 S. 3) In der Abbildung 6 ist die Instandhaltung mit ihren Unterbereichen dargestellt, diese sich wiederum in ihren Zielen und Maßnahmen unterscheiden.

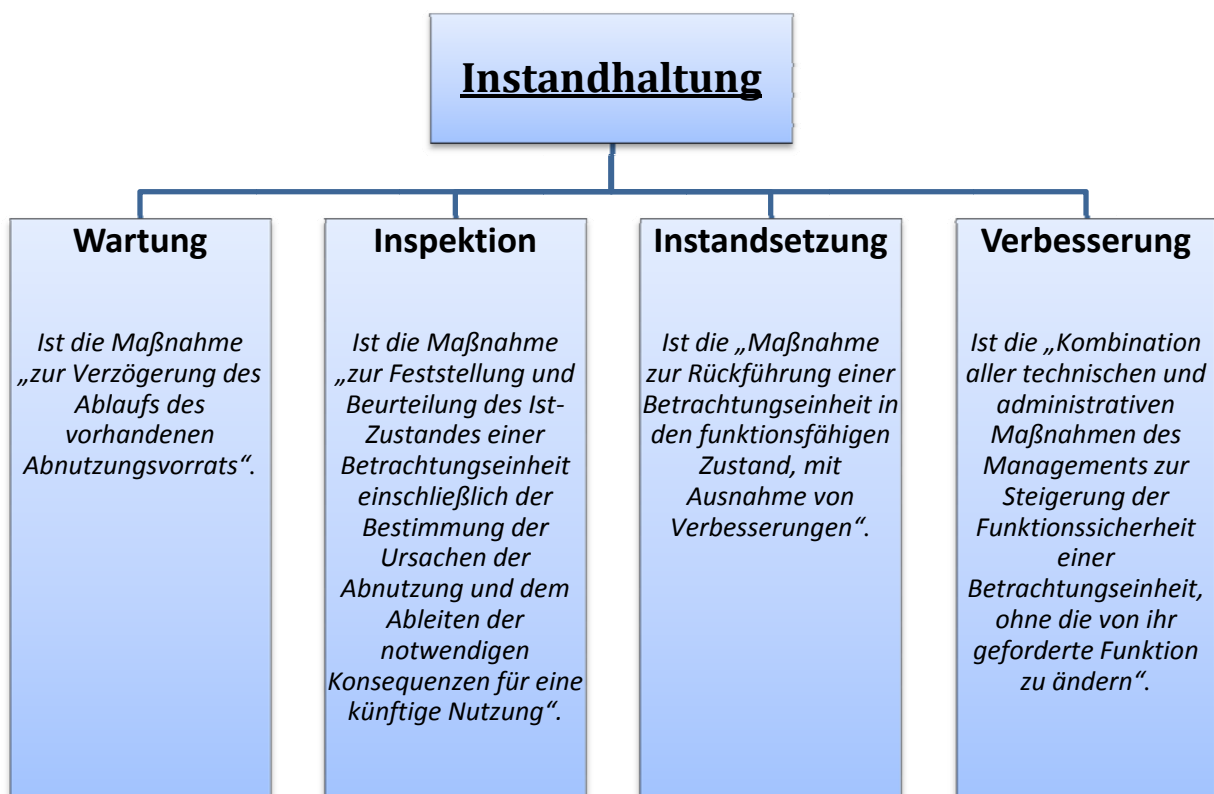


Abbildung 6: Instandhaltung im Überblick

Quelle: (DIN 31051: 2003-06, 2003 S. 3 f.)

Das primäre Ziel einer Wartung besteht darin, den Abbau des Abnutzungsvorrates aktiv zu verkleinern, dabei können Wartungstätigkeiten beispielsweise das

- Reinigen,
- Konservieren,
- Schmieren oder
- Nachstellen beinhalten. (Baum, et al., 1993 S. 8), (Schmidt, 1992 S. 65)

Mittels einer Inspektion können Informationen über den aktuellen Ist-Zustand der Komponente bezüglich ihrer Abnutzung gesammelt werden. Diese Inspektionsmaßnahmen ändern nichts an dem Zustand der Betrachtungseinheit. Sie umfassen u. a. lediglich

- Überwachungstätigkeiten,
- Funktions- und Genauigkeitskontrollen, die den aktuellen Abnutzungsvorrat bestimmen können. (Baum, et al., 1993 S. 10)

Die Instandsetzung² umfasst alle Maßnahmen, die dazu dienen den Sollzustand der Betrachtungseinheit wiederherzustellen. Das kann beispielsweise das Ausbessern defekter Teile oder deren kompletten Austausch beinhalten. (Warnecke, 1984 S. 579) Die Instandsetzungsmaßnahmen können störungsbedingt oder vorbeugend, d.h. nach oder vor Eintritt eines Ausfalls, durchgeführt werden. Unter der störungsbedingten (ausfallbedingten) Instandsetzung versteht man die Reparatur, „[...] die eine Erhöhung des Abnutzungsvorrates über die Schadensgrenze zum Ziel hat.“ (Baum, et al., 1993 S. 10) Die vorbeugende Instandsetzung (Prävention) dient zur Erhöhung des Abnutzungsvorrates auf einen vordefinierten Sollwert. (Baum, et al., 1993 S. 10) Der Unterschied zwischen Reparatur und Prävention besteht darin, dass bei der Reparatur die Funktionsfähigkeit wiederhergestellt wird, wobei die Prävention den Abnutzungsvorrat auf den objektspezifischen maximalen Wert erhöht. (Baum, et al., 1993 S. 10)

Zusammenfassend ist das Ziel der Instandhaltung die Leistungsfähigkeit der Betrachtungseinheit qualitativ sowie quantitativ zu erhöhen. Darüber hinaus sehen Baum und Rosenbrock (Baum, et al., 1993 S. 10) die Ziele der Instandhaltung in

1. einer Minimierung von Arbeitszeit-, Material- und Energiebedarf für Betrieb und Instandhaltung,
2. in Verbindung mit Verbesserungen in der Umweltverträglichkeit und
3. einer Verlängerung der Nutzungsdauer.

² Für die Instandsetzung gibt es in der Literatur unterschiedliche Definitionen. Aus der DIN 31051 geht hervor, dass die Instandsetzung nur nach einem Ausfall eintritt. Im Gegensatz dazu wird in zahlreicher Literatur die Instandsetzung, als Maßnahmen definiert, die vorbeugend und ausfallbedingt, d.h. bevor oder nach Eintritt eines Ausfalls, erfolgen. (IAS- Institut für Analytik und Schwachstellenforschung), (Warnecke, 1984), (Proksch, 2002), (Baum, et al., 1993), (Grothus, 2006) Für die folgenden Betrachtungen wird die Definition der ausfallbedingten sowie der vorbeugenden Instandsetzung zu Grunde gelegt.

2.2 Grundstrategien der Instandhaltung

Die Instandhaltungsstrategie wird nach Baum und Rosenbroch (Baum, et al., 1993 S. 13) definiert als „eine objektspezifisch festgelegte Kombination aus Instandhaltungsmaßnahmen, wobei für jede Maßnahme das durchführende Personal und die Intervallart konkretisiert sind.“

Nach Schmidt und Fischer wird die Instandhaltung (vgl. Abbildung 7) untergliedert in eine

- vorbeugende und
- ausfallbedingte (wiederherstellbare) Instandhaltung.

(Schmidt, 1992 S. 64), (Fischer, 1984 S. 227)

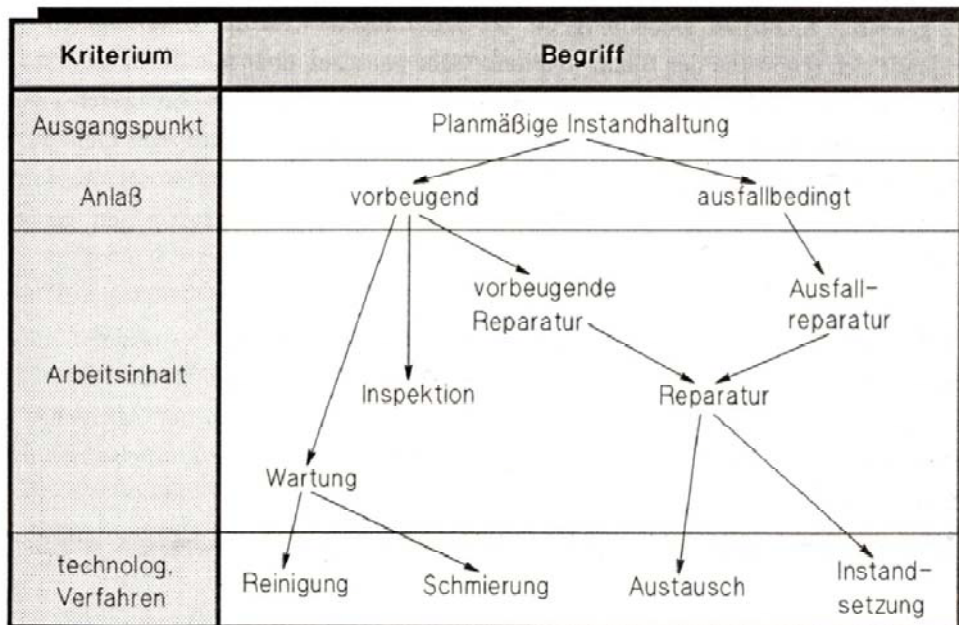


Abbildung 7: Hierarchie von Instandhaltungstermini

Quelle: (Schmidt, 1992 S. 65)

Aus dieser Einteilung resultieren drei Hauptstrategien:

1. die ausfallbedingte Instandhaltung,
2. die vorbeugende (präventive) Instandhaltung und
3. die Inspektionsstrategie,

die nachfolgend näher erläutert werden.

2.2.1 Ausfallbedingte Strategie

Die ausfallbedingte Instandsetzung, auch als „Feuerwehrstrategie“ bekannt, tritt nur zur Behebung eines Schadens auf. (Loss, 1996 S. 18) Hierbei steht die Ausnutzung des Abnutzungsvorrates im Vordergrund. Diese ausfallbedingte Instandsetzung wird beispielsweise bei wartungsfreien, redundanten bzw. weniger bedeutenden Elementen mit geringer Ausfallwahrscheinlichkeit eingesetzt, da deren Ausfall(folge)kosten geringer sind als die Wartungskosten. Diese Strategie wird auch empfohlen, wenn entweder gar keine Informationen über den Abnutzungsverlauf der Betrachtungseinheit bekannt sind oder die Ausfallrate³ einen konstanten bzw. sinkenden Verlauf während der Nutzungsdauer aufweist. (Adam, 1989 S. 69)

Dieses Modell hat den Vorteil einer optimalen Ausnutzung der Komponente. Darüber hinaus ist der Planungsaufwandes dispositiver Arbeit im Vergleich zur Zeitstrategie erheblich geringer und die direkten⁴ Instandhaltungskosten sind minimal. (Adam, 1989 S. 75) Diesen Vorteilen stehen jedoch folgende Nachteile:

- negative Beeinflussung der Arbeitsqualität auf Grund des hohen Zeitdrucks während der Instandhaltung
- schlechte Abschätzbarkeit der Instandhaltungs- und Ausfallkosten
- längere Stillstandszeiten durch Kapazitätsspitzen in der Instandhaltungsabteilung
- Verursachung von Folgeschäden an anderen Komponenten/ Systemen
- Keine Garantie für hohe Verfügbarkeit der Anlage oder Komponente

gegenüber. (Adam, 1989 S. 75 f.)

Die ausfallbedingte Strategie ist somit nur an bestimmten Stellen sinnvoll, wenn Instandhaltungsobjekte weder jederzeit verfügbar, noch besonders zuverlässig sein müssen. (Baum, et al., 1993 S. 15)

³ Die Ausfallrate $\lambda(t)$ beschreibt die „Anzahl der Ausfälle in einem Zeitintervall dt , bezogen auf die Anzahl der zum Zeitpunkt t noch intakten Einheiten.“ (Fritz, 2001 S. 6) (vgl. Kapitel 4.4.4)

⁴ Den direkten Instandhaltungskosten können bestimmte Instandhaltungsleistungen direkt zugeordnet werden. Sie bestehen u.a. aus den Kostenarten: Personalkosten, Materialkosten, Kapitalkosten. Indirekte Instandhaltungskosten entstehen in Folge eines Ausfalls einer Betrachtungseinheit und bestehen u.a. aus Stillstandskosten, Kosten für entgangene Gewinne, Kosten für den Wiederanlauf. (Proksch, 2002 S. 56 f.)

2.2.2 Zeitstrategie

Die Zeitstrategie definiert sich nach festgelegten Zeitintervallen⁵, in denen Wartungen durchgeführt werden. Die Instandsetzungsmaßnahmen erfolgen entweder zeitabhängig (geplant) oder unmittelbar nach Ausfällen. Somit ist die ungefähre Kenntnis der Abnutzung und des Ausfallzeitpunkts einer Betrachtungseinheit die Grundvoraussetzung für die Anwendung dieser Strategie. (Proksch, 2002 S. 31 f.) (Baum, et al., 1993 S. 16) Mittels der Zeitstrategie soll eine stetige und sichere Funktionsfähigkeit einer Betrachtungseinheit während seiner gesamten Nutzungsdauer garantiert werden. (Baum, et al., 1993 S. 16) Somit kommt die vorbeugende Instandhaltungsstrategie hauptsächlich in den Bereichen zum Einsatz, in denen die einwandfreie Funktionsfähigkeit der Anlagen, das Leben und die Gesundheit von Menschen sichert oder Folgeschäden mit hohen Kosten vermieden werden können. (Baum, et al., 1993 S. 16), (Bandow, 2006 S. 60)

Die Vorteile dieser Strategie liegen in der Verringerung oder Vermeidung instandhaltungsbedingter Stillstandszeiten und in der hohen Zuverlässigkeit⁶ bzw. Verfügbarkeit der Anlagen. Weiterhin ist es hier möglich die Instandhaltungskosten und die Ausfallkosten durch eine bessere Maßnahmendurchführung zu minimieren. Dies kann man u.a. durch Blockbildung zeitlich beieinander liegender Instandhaltungsmaßnahmen erreichen und so neben einer Kostenersparnis auch die Instandhaltungszeiten verkürzen. (Baum, et al., 1993 S. 16), (Adam, 1989 S. 70 ff.)

Ein schwerwiegender Nachteil dieser Strategie ist die Ermittlung der Ausfallzeitpunkte. Auf Grund dieser ungenauen Daten bezüglich des Ausfallverhaltens von Komponenten, ist man aus Sicherheitsgründen gezwungen, Teile vorzeitig auszutauschen. Damit schränkt man die Nutzung der Lebensdauer dieser Teile ein. Dementsprechend steigen die direkten Kosten durch die erhöhte Anzahl der Instandhaltungseinsätze und dem erhöhten Verbrauch an Reserveteilen. Dadurch ist die Wirtschaftlichkeit dieser Strategie nicht in jedem Fall gegeben. (Adam, 1989 S. 73) (Baum, et al., 1993 S. 16 f.)

⁵ Die Zeitintervalle basieren meistens auf Erfahrungswerten. (Baum, et al., 1993 S. 16)

⁶ Die Zuverlässigkeit ist definiert als „die Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit oder ein Bauteil oder ein System, während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“ (Fritz, 2001 S. 5) (vgl. Kapitel 4.4.2 Überlebenswahrscheinlichkeit/ Zuverlässigkeit)

2.2.3 Inspektionsstrategie- die Zustandorientierte Instandhaltung

Die zustandsorientierte Instandhaltung (engl. Condition Based Maintenance) zeichnet sich durch planmäßige Inspektion, in Form von technischer Überwachung oder technischer Diagnose der Abnutzung einer Komponente bzw. Anlage aus. Abhängig von diesem festgestellten Verschleiß werden dann die jeweils spezifischen Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt. Unterschreitet das Ergebnis der Inspektion ein zulässiges Maß für die minimale Abnutzung, so erfolgt der Austausch des Teils (Proksch, 2002 S. 33).

Während der Inspektion wird der tatsächliche Ist-Zustand des Abnutzungsvorrates der Komponente ermittelt und mit einem Soll- Wert verglichen. Anschließend wird daraus die restliche Nutzungsdauer und somit der vermutliche Ausfallzeitpunkt berechnet (Baum, et al., 1993 S. 17). Weiterhin lässt sich durch eine Inspektion aktuelle Informationen bezüglich Termin, Art und Umfang der Instandhaltungsmaßnahmen ableiten, die notwendig sind, um die Lücke zwischen dem Soll- und Ist-Zustand des Instandhaltungsobjektes zu schließen (Proksch, 2002 S. 33).

Diese Strategie ist geeignet für Bauteile, die im Laufe ihrer Nutzungsdauer eine ansteigende Ausfallneigung besitzen, beispielsweise mechanische Teile. Voraussetzung für die Anwendung dieser Strategie ist die Messbarkeit des Abnutzungsvorrates mit einem vertretbaren Aufwand. Gleichmaßen gilt als Voraussetzung, dass der Inspektionsaufwand günstiger ist als die Folgekosten eines möglichen Ausfalls oder geringer ist als das vorzeitige Austauschen der Teile im Rahmen der Zeitstrategie. Weiterhin wird diese Strategie eingesetzt bei sicherheitsrelevanten Teilen, die für Leben und Gesundheit von Menschen verantwortlich sind oder wenn Folgeschäden eines Ausfalls hohe Kosten verursachen würden (Baum, et al., 1993 S. 17).

Die Vorteile der Inspektionsstrategie liegen zum einen in einer effizienten Ausnutzung der Komponente über ihre Nutzungsdauer ohne dabei die Zuverlässigkeit zu gefährden. Damit verringern sich die Ausfallkosten. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die gute Planbarkeit der Inspektions- und Wartungsmaßnahmen. Diesen Vorteilen stehen jedoch relativ hohe Inspektionskosten gegenüber (Baum, et al., 1993 S. 17).

2.3 Auswahl der Instandhaltungsstrategie

Die Instandhaltung dient aus gesamtunternehmerischer Sicht zur Realisierung technischer sowie wirtschaftlicher Ziele. Dabei stehen sich jedoch einige Ziele, wie aus der Beziehungsmatrix (vgl. Abbildung 8) verdeutlicht wird, konkurrierend gegenüber. Beispielsweise hängt die Anlagenverfügbarkeit von der Art und dem Umfang der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen ab. Das bedeutet, je häufiger Instandhaltungen durchgeführt werden, desto besser ist die Anlagenverfügbarkeit⁷. Jedoch steigen in diesem Zusammenhang auch die Instandhaltungskosten. Somit ist es nicht möglich, die technische Anlagenverfügbarkeit, bei gleichzeitiger Minimierung der Instandhaltungskosten zu maximieren.

Dennoch gibt es auch komplementäre Formalziele, die sich gegenseitig ergänzen (vgl. Abbildung 8). So resultieren aus den einzuleitenden Maßnahmen zur Minimierung der Ausfall(folge)kosten gleichzeitig eine Verringerung der technischen Störungszeiten und der Ausfallzeiten. (Proksch, 2002 S. 27)

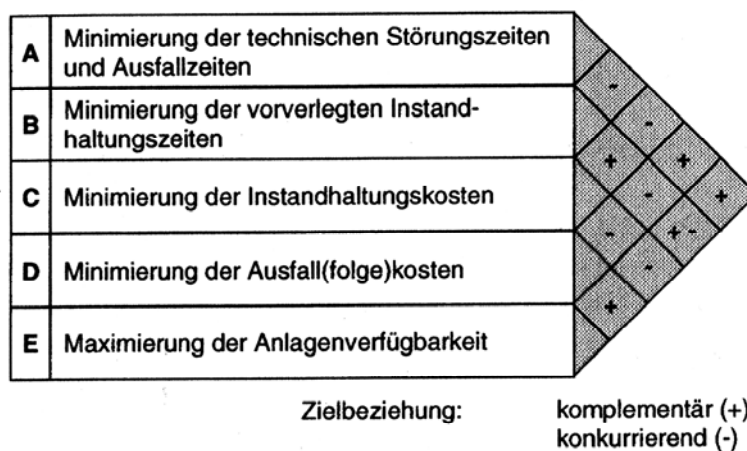


Abbildung 8: Beziehungsmatrix der Formalziele

Quelle: (Proksch, 2002 S. 27)

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick gegeben, welche technischen und wirtschaftlichen Faktoren unbedingt bei der Strategiewahl berücksichtigt werden sollten. Auf Grund einiger konkurrierender Formalziele müssen, bei der Auswahl der Instandhaltungsstrategie Kompromisse eingegangen werden. In diesem Zusammenhang wird, vor allem im Bereich Maschinen- und Anlagebau, die zustandsorientierte Instandhaltung immer relevanter.

⁷ Unter Berücksichtigung, dass die Instandhaltungsmaßnahmen zu Zeiten durchgeführt werden, in denen die Anlage nicht verwendet wird (z.B. in Betriebspausen).

2.3.1 Technische Betrachtung

Aus technischer Sicht ist bei der Auswahl der Instandhaltungsstrategie, die Maximierung der Anlagenverfügbarkeit und die optimale Ausnutzung des Abnutzungsvorrates am wichtigsten. Die Auswahl einer geeigneten Strategie kann nur speziell für eine Betrachtungseinheit, unter Berücksichtigung der jeweiligen sicherheitskritischen Anforderungen erfolgen. Da Ausfälle nie zu 100% ausgeschlossen werden können, kann die optimale Instandhaltung nur eine Kombination aus den drei beschriebenen Grundstrategien sein. Die Abbildung 9 zeigt mögliche Auswahlkriterien, für die im Kapitel 2.2 beschriebenen Strategien, im Überblick. Dabei spielen die kontinuierlichen Verbesserungsprozesse insbesondere bei der zustandsorientierten Instandhaltung eine große Rolle. Da sich die zustandsorientierte Instandhaltung durch eine stetige Überprüfung und Überwachung des Anlagenzustandes anhand Inspektionen auszeichnet, sind geeignete Inspektionszyklen enorm wichtig. Somit sollte eine Optimierung dieser Zyklen u.a. anhand Lebensdauer kennzahlen (z.B. MTBF⁸-Werten) und/ oder Checkergebnissen (Soll/Ist- Vergleiche) erfolgen. (IAS- Institut für Analytik und Schwachstellenforschung S. 2)

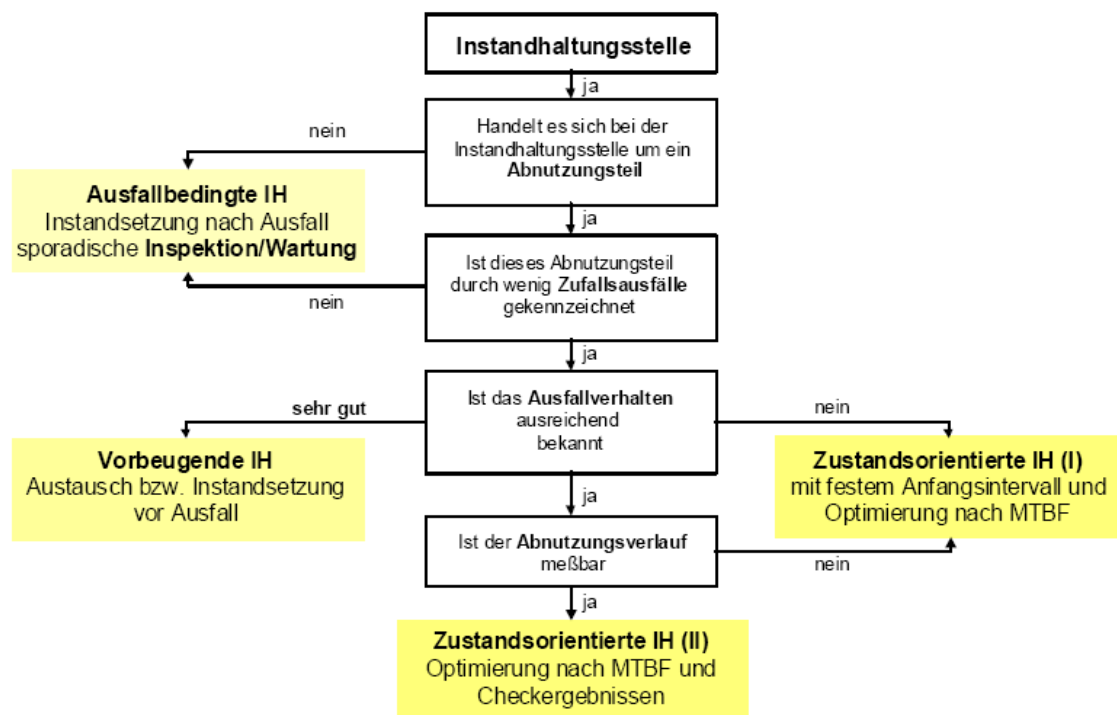


Abbildung 9: Fragen zur Strategieauswahl

Quelle: (IAS- Institut für Analytik und Schwachstellenforschung)

⁸ MTBF entspricht der mittleren Lebensdauer einer reparierbaren Betrachtungseinheit (vgl. Kapitel 4.4.5, 4.5.1)

2.3.2 Kostenbetrachtung

Mit der Auswahl der Instandhaltungsstrategie werden die Kosten während der Nutzungsphase der Betrachtungseinheit zu einem entscheidenden Maße bestimmt. Nun stellt sich die Frage, wie man eine geeignete Auswahl der Instandhaltungsstrategien treffen kann. (Adam, 1989 S. 67) Dabei besteht das Ziel dieses Optimierungsproblems in der Minimierung der anfallenden Instandhaltungskosten, bei konstanter oder verbesserter technischer Verfügbarkeit. In diesem Zusammenhang würde das Ausfallverhalten ebenso konstant bleiben bzw. reduziert werden.

In dem folgenden Diagramm (Abbildung 10) ist der Kostenverlauf der Instandhaltungsmaßnahmen (Wartungen, Inspektionen) und der Instandsetzungen (Austausch, Reparatur) dargestellt. Aus deren Summe setzen sich die gesamten Instandhaltungskosten einer Betrachtungseinheit zusammen. Wie aus dem Diagramm zu erkennen ist, haben die Punkte A und B die gleichen Instandhaltungskosten, jedoch bei unterschiedlichen Strategien. Während bei der einen Strategie (Punkt A) geringe Kosten für Wartungen/ Inspektionen aufgewandt werden, fallen entsprechend höhere Instandsetzungen an. Im Vergleich zu der anderen Strategie (Punkt B) ist das Verhältnis, zwischen den Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten, dem entgegengesetzt. Folglich lässt sich daraus ableiten, dass die Instandhaltungsstrategie mit dem Umfang und der Häufigkeit der Instandhaltungsmaßnahmen, die Zuverlässigkeit der Betrachtungseinheit bestimmt.

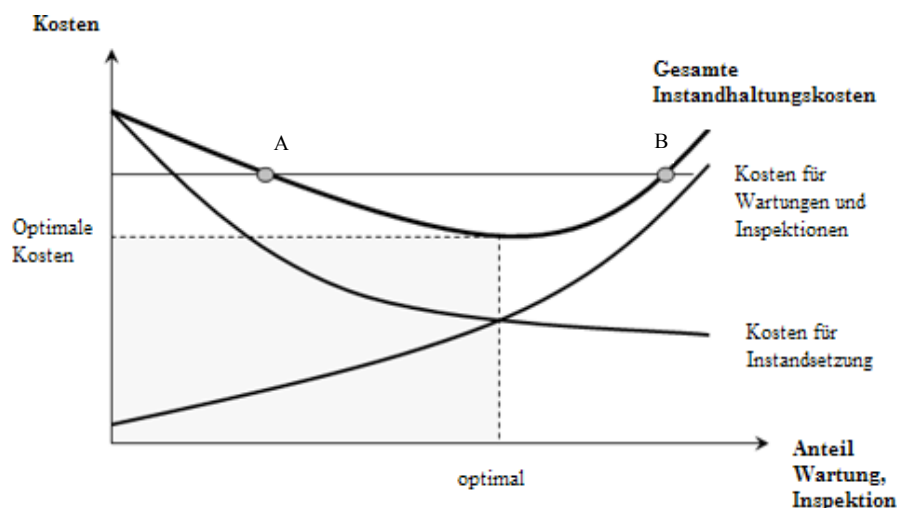


Abbildung 10: Kostenverlauf in Abhängigkeit eines steigenden Anteils an IH- Maßnahmen

Quelle: (FM- Beratungs- und Ingenieur Netzwerk S. 44)

Aus dem Komplement der Zuverlässigkeit ergibt sich wiederum die Ausfallwahrscheinlichkeit, die die Anzahl der Ausfälle bestimmt und damit die relativ hohen Instandsetzungskosten. (Fischer, 1984 S. 237) Das heißt, je mehr Wartungen durchgeführt werden, desto höher ist die Zuverlässigkeit⁹ und desto geringer ist die Anzahl der Ausfälle. Demzufolge ist, wie bereits aus der Beziehungsmatrix (vgl. Abbildung 8) hervorging, die Minimierung der Instandhaltungskosten bei gleichzeitiger Minimierung der Ausfall(folge)kosten nicht möglich. Das Kostenoptimum, d.h. die minimalen Gesamtkosten, findet man somit bei einer bestimmten Anzahl von Wartungsmaßnahmen (event. mit Inspektionen) und einer bestimmten Anzahl an Instandsetzungen.

Die Instandhaltung ist letztendlich ein entscheidender Faktor, mit dem eine gute und konstante Qualität der erzeugten Produkte bzw. Dienstleistungen langfristig garantiert werden kann. Folglich versteht man die „[...] Instandhaltung, als ein Teilsystem des Unternehmenssystems, das einen aktiven Beitrag zur Anpassung des Leistungsangebotes an die Markterfordernisse leistet [...]“. (Schmidt, 1992 S. 78) Insofern wirken sich durchgeführte sowie unterlassene Instandhaltungsleistungen auf den Kundennutzen und den Marktanteil im Zusammenhang mit der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens aus. (Schmidt, 1992 S. 78) Diese Beziehungen sind in der folgenden Abbildung grafisch veranschaulicht.

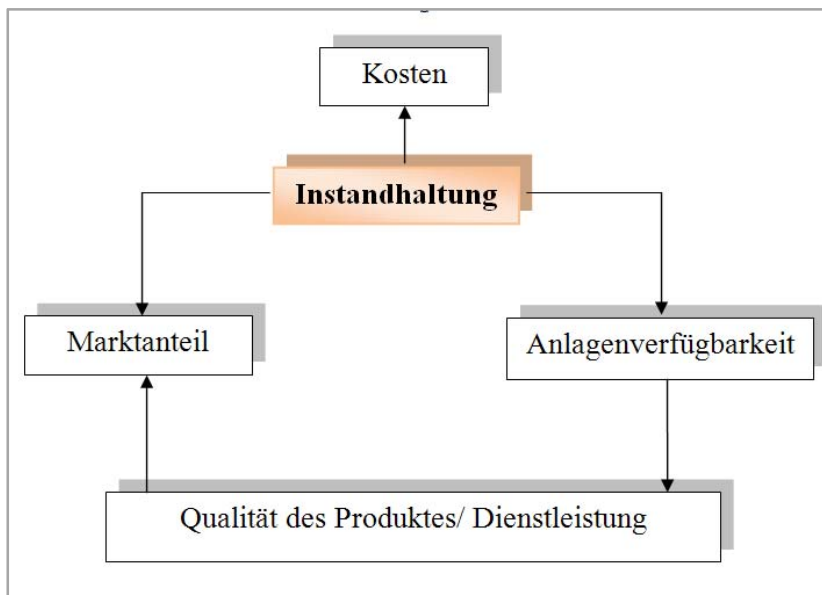


Abbildung 11: Allgemeine Wirkzusammenhänge zwischen Instandhaltung und Qualität

Quelle: In Anlehnung an (Prosch, 2002 S. 60) und (Schmidt, 1992 S. 78)

⁹ Unter Berücksichtigung, dass die Instandhaltungsmaßnahmen zu Zeiten durchgeführt werden, in denen die Anlage nicht in Gebrauch ist (z.B. in Betriebspausen).

2.3.3 Trend zur Zustandsorientierten Instandhaltung im Maschinen- und Anlagenbau

Auf Grund des erheblichen Einflusses der Instandhaltungskosten auf die Lebenszykluskosten, ist aktuell ein weltweiter Trend zur Umstellung auf zustandsorientierten Instandhaltung im Maschinen- und Anlagenbau festzustellen. (Alexandrovitsh, 2002 S. 5)

Wie in dem Kapitel 2.2.3 erläutert wurde, zeichnet sich die zustandsorientierte Instandhaltung dadurch aus, dass Wartungen bzw. Ersatzinvestitionen nur durchgeführt werden wenn der technische Zustand der Betrachtungseinheit es erfordert. Daraus ergeben sich neben Kostenersparnissen und effektiven Ausschöpfungen der Abnutzungsvorräte auch höhere Zuverlässigkeiten und damit gesteigerte technische Verfügbarkeiten der Maschinen oder Anlagen. (Alexandrovitsh, 2002 S. 5) (Proksch, 2002 S. 53 ff.)

Als Grundvoraussetzung für eine effektive zustandsorientierte Instandhaltung ist die Kenntnis über den technischen Abnutzungsvorrat (Zustand) des Bauteils unerlässlich. Dafür sind leistungsfähige technische Diagnostikverfahren, mit denen vielseitige Information gewonnen werden können, unerlässlich. Die physikalischen Zustände werden mit Hilfe dieser Verfahren möglichst genau erfasst und anschließend anhand bestehender Vergleichsmöglichkeiten bewertet. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Lebensdauer der Betrachtungseinheit zu maximieren, ohne dass das Bauteil auf Grund von Störungen ausfällt. (Alexandrovitsh, 2002 S. 4 ff.)

Letztendlich stellt die zustandsorientierten Instandhaltung in Verbindung mit verlässlichen Messverfahren für den Anlagenbetreiber ein enormes Einsparungspotential dar, das einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens leistet. Nach Alexandrovitsh (2002, S. 6) wurde die zustandsorientierte Instandhaltung bereits in vielen Gebieten des Maschinen- und Anlagenbaus eingeführt. Dazu sind beispielsweise der Werkzeugmaschinenbau, Walzwerktechnik, Schiffsmaschinenbau, Getriebetechnik SPS-Steuerungs-Diagnose und Überwachung, Kraftwerke, Betriebsüberwachung in Tagebauen aufzuführen. (Alexandrovitsh, 2002 S. 6) Somit könnte die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie ebenso für den Bereich der Eisenbahnleit- und –Sicherheitstechnik ein erstrebenswertes Ziel darstellen, das es zu überprüfen gilt (vgl. Kapitel 4).

3 Instandhaltung in der Eisenbahnleit- und - Sicherungstechnik

3.1 Begriffsdefinition: Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik

Die Besonderheit des Schienenverkehrs ist zum einen gekennzeichnet durch extrem lange Bremswege und zum anderen durch Spurführung. Die langen Bremswege resultieren aus geringer Haftreibung, die auf Grund des gleichen Materials (Eisen) zwischen Räder und Schienen entsteht. Demzufolge ist ein Fahren auf Sicht im Schienenverkehr nicht realisierbar.

Die Spurführung ermöglicht einen sehr sicheren Lauf von Schienenfahrzeugen, solange bestimmte physikalische Grenzen nicht überschritten werden. Ist die Spurführung auf Grund störender Einflüsse nicht mehr gegeben, so kann es zu unkontrollierten und gefährlichen Bewegungen des Schienenfahrzeuges kommen, die meist zu einem Verlassen des Lichtraumes¹⁰ führen und möglicherweise in einer Kollision enden (Maschek, 2007 S. 599).

Demzufolge sind von vornherein bestimmte Maßnahmen einzuleiten, um diesen Sicherheitsansprüchen gerecht zu werden. (Maschek, 2007 S. 599) An dieser Stelle kommt der Eisenbahnsicherungstechnik eine entscheidende Bedeutung zu, da diese in Verbindung mit dem Oberbau und der Fahrzeugkonstruktion für die Vermeidung von Zugentgleisungen zuständig ist. (Maschek, 2007 S. 599) Die Sicherungstechnik wird in Zugsicherung und Fahrwegsicherung unterteilt und umfasst alle Anwendungen, die die Zuggeschwindigkeit beeinflussen bzw. überwachen. Darüber hinaus kann auch gegebenenfalls eine Kontrolle der Fahrtrichtung vorgenommen werden. Folglich können mit Hilfe der Zugsicherung Gefährdungen auf Grund der Zuggeschwindigkeit ausgeschlossen werden. Die Fahrwegsicherung umfasst alle Anwendungen, die die Fahrwegelemente (z.B. Signale) beeinflussen, um in diesem Bereich eventuelle Gefährdungen für Züge zu vermeiden. (Grimm, et al., 2005-09-19-20 S. 3 ff.)

Die Leittechnik umfasst dispositive Tätigkeiten, die technisch automatisiert ablaufen, jedoch nicht sicherheitsrelevant sind. Sie ermöglicht den Fernbetrieb von Stellwerken und trägt einen wesentlichen Betrag zur Erleichterung der Disposition der Strecke bei. Damit wird eine

¹⁰ Lichtraum ist der gedachte Tunnel, der die Gleise mit den event. vorhandenen Fahrleitungen einschließt, um eine kollisionsfreie Fahrt zu gewährleisten. In diesen Lichtraum dürfen keine äußeren Gegenstände hineinragen. (Naumann, et al., 2004 S. 140)

bessere Nutzung der Streckenkapazität ermöglicht und darüber hinaus eine Sicherung von Anschlüssen sowie die Vernetzung mit anderen Verkehrsmitteln garantiert.

Letztendlich ist die Leittechnik funktional eng mit der Sicherungstechnik verbunden. Somit ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Leit- und Sicherungstechnik im Eisenbahnbereich sinnvoll. Demzufolge entwickelte sich bereits in den ersten Gründungsjahren der Deutschen Bahn die Bezeichnung „Leit- und Sicherungstechnik“ (LST) (Maschek, 2007 S. 633).

3.2 Aktueller Stand der Entwicklung: Instandhaltung der LST-Systeme bei der Deutschen Bahn AG

Wie aus dem vorhergehenden Abschnitt deutlich wurde, hängt die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs zu einem entscheidenden Maß von der Leit- und Sicherheitstechnik (LST) ab. Aus diesem Grund muss die völlige Funktionsfähigkeit der LST- Anlagen über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet werden. Damit rückt das Thema der Instandhaltung in den Vordergrund der Betrachtung. Die Instandhaltungsmaßnahmen müssen der jeweiligen sicherheitskritischen Funktion angemessen sein und gleichzeitig auch unternehmerisch vertretbar. (Signal + Draht (93), 2001 S. 5)

Nach Linau (Lienau, 2006 S. 70) ordnet die DB Netz AG einzelne Bauteile, wie beispielsweise Weichenantrieb oder Signal Anschlusseinheiten¹¹(ASE) zu. Darüber hinaus erfolgt eine weitere Einteilung der Strecken und damit der Bauteile in drei Belastungsklassen. Diese Belastungsklassen werden unter Berücksichtigung von Sicherheitsansprüchen in Form von Höchstgeschwindigkeiten, Streckenbereichen¹² und Lasttonnen sowie von der Bedeutung der Verfügbarkeit der Strecke (Zugzahlen, Gattung des Schienenfahrzeuges) bestimmt. Die Deutsche Bahn AG unterteilt demzufolge in ihrem Regelwerk die Strecken in:

- Schwachen Verkehr,
- Normalen Verkehr und
- Starken Verkehr.

¹¹ Die Anschlusseinheiten (ASE) sind Funktions- und Hardwaremodule, durch die sich Stellwerke eindeutig darstellen lassen. (Müller, et al., 2001 S. 328)

¹² Die Streckenbereiche werden beispielsweise in „durchgehende Hauptgleise in Bahnhöfen“ oder „Gleise der freien Strecken“ unterschieden. (Lienau, 2006 S. 85)



Falls verschiedene Kriterien zu unterschiedlichen Einstufungen führen, wird generell der maximale Wert angenommen. (Lienau, 2006 S. 85)

Nachdem die Bauteile entsprechend eingeteilt wurden, wird als nächstes eine wöchentliche Sollzeit für Inspektion, Wartung und Instandsetzung vorgegeben. Diese Zyklen in Verbindung mit den jeweils vorgeschriebenen Instandhaltungsmaßnahmen sind in der Konzernrichtlinie der Instandhaltung von Sicherungsanlagen (Modulreihe 892.xxxx) definiert. Diese Instandhaltungsregeln wurden in Abstimmung zwischen der DB AG und dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) festgelegt und sind zwingend einzuhalten. (Signal + Draht (93), 2001 S. 5)

„Aus sicherheitlicher Sicht hat sich das Regelwerk¹³ bisher bewährt, stellt aber aus unternehmerischer Sicht an die Kostenoptimierung der Instandhaltungsprozesse noch weitere Anforderungen.“ (Signal + Draht (93), 2001 S. 6) Nun gilt es einen Kompromiss zwischen den konkurrierenden Instandhaltungszielen einer hohen technischen Zuverlässigkeit und Sicherheit bei gleichzeitig angemessener Finanzierbarkeit einzugehen. (Signal + Draht (93), 2001 S. 6)

Aus der Konzernrichtlinie 892.xxxx geht für einige LST- Systeme bzw. Komponenten hervor, dass zum aktuellen Zeitpunkt bereits Inspektionen durchgeführt werden. Hier kann man jedoch nur bedingt von Ansätzen der zustandsorientierten Instandhaltung sprechen, da noch kein entsprechendes Diagnoseverfahren zur Zustandsmessung in der Anwendung ist. Somit können bis jetzt Fehler nur mittels manueller Überwachung aufgedeckt werden, das wiederum Wegekosten und dadurch geringe Arbeitsproduktivität der Instandhaltungsmitarbeiter nach sich zieht. (Signal + Draht (93), 2001 S. 5), (DB Netz AG, 2006 S. 3)

¹³Das Regelwerk entspricht der Konzernrichtlinie 892.xxxx.

3.3 Festlegung des Untersuchungsbereichs

Aufgrund der hohen Komplexität bezüglich der Instandhaltungstheorien im Bereich der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik, ist es im Rahmen dieser Diplomarbeit leider nicht möglich auf alle wichtigen Systeme einzugehen. Aus diesem Grund wurde eine Auswahl der bedeutendsten Systeme und deren wichtigsten Komponenten vorgenommen, die in AnyLogic®- System Dynamics abgebildet sind (vgl. Kapitel 4). Dabei wurde die Verkabelung, aufgrund des geringen Verschleißes außer Acht gelassen.

Für jede der unten aufgeführten Komponente der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik (vgl. Tabelle 1) wurde der signifikante Abnutzungsparameter festgelegt. Dabei zählt zu den charakteristischen Abnutzungsparametern im Bereich Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik die:

- Liegezeit¹⁴,
- Betriebszeit¹⁵ und die
- Anzahl der Zugüberfahrten¹⁶.

System	Komponenten	Abnutzungsparameter
Gleisstromkreis	Gleisrelais	Anzahl der Zugüberfahrten
	Stromquelle	Liegezeit
	Isolierstöße	Liegezeit
Achszähler	Achszählkontakte	Anzahl der Zugüberfahrten
	Anschlusskasten	Liegezeit
	Achszählauswerteeinrichtung	Anzahl der Zugüberfahrten
Weichenantrieb	Drehstrommotor	Anzahl der Zugüberfahrten
	Getriebe	Anzahl der Zugüberfahrten
	Kontakte	Anzahl der Zugüberfahrten
	Prüferstangen	Anzahl der Zugüberfahrten
Signal	Leuchtdiode ¹⁷	Liegezeit
	Signalbildschirm	Liegezeit

Tabelle 1: Definition der LST- Systeme und LST- Komponenten für die Modellierung, Zuordnung der Abnutzungsparameter

In den folgenden Kapiteln werden diese LST- Systeme zum bessern Überblick näher beschrieben.

¹⁴ Liegezeit ist die gesamte Zeit, seit dem die Komponente in Benutzung ist. 24 Stunden am Tag, 7 Tage pro Woche.

¹⁵ Betriebszeit ist die Zeit, in der die Komponente tatsächlich im Betrieb ist. Z.B. 8 Stunden am Tag, 5 Tage pro Woche.

¹⁶ Die Abnutzung dieser Komponente ist allein abhängig von der Belastung in Form von Zugüberfahrten, nicht von der Zeit.

¹⁷ Die Komponente „Leuchtdiode“ umfasst Leuchtdioden und die gesamten Elektronik des Signals.

3.4 Beschreibung der modellhaft abzubildenden LST- Systeme

3.4.1 Gleisfreimeldeanlage

Eine Gleisfreimeldeanlage wird nach Naumann und Pachel (2004) definiert als „[...] eine technische Einrichtung, die mit ausreichend hoher Sicherheit den Frei- oder Besetztzustand von Bahnhofs- und Streckengleisabschnitten sowie von Weichen automatisch und auf technische Weise feststellen kann“. Die daraus resultierende Gleisfreimeldung kann mit Hilfe von Gleisstromkreisen, Achszähler und mit Einschränkung auch Technische Zugschlussmelder¹⁸ realisiert werden. Weiterhin kann eine Strecke auch mittels Schaltungen als frei bestätigt werden, indem ein beauftragter Mitarbeiter im Bahnbetrieb visuell den Freizustand durch Tasten- oder Schlüsselbetätigung zu einem Stellwerk weiterleitet (Naumann, et al., 2004 S. 111).

Befindet sich, nach einer Prüfung der Gleisfreimeldeanlage, kein weiterer Zug in einem bestimmten Gleisabschnitt, so erfolgt eine Gleisfreimeldung bezüglich dieser Strecke. Diese Freimeldung ist eine zwingende Voraussetzung für die Zulassung einer Zugfahrt (Naumann, et al., 2004 S. 111).

In den weiteren Betrachtungen wird sich auf die Gleisfreimeldeanlage mittels Gleisstromkreisen und Achszählern beschränkt.

3.4.1.1 Gleisstromkreis

Bei Gleisstromkreisen werden an den Blockabschnittsgrenzen¹⁹ die Schienen als elektrischer Leiter eingesetzt. Die Schienen werden durch Isolierstöße elektrisch voneinander getrennt, wobei eine der Fahrschienen und das Blocksignal zu einem Stromkreis zusammengeschlossen werden (vgl. Abbildung 12). (Fiedler, 1999 S. 197) Dieser Gleisabschnitt wird dann von einem Signal- und Blockstrom (Gleich- oder Wechselstrom) gespeist. Der Signalstrom fließt über das Lichtsignal. Dieses ruft den Anzug eines Relais hervor und damit das Leuchten des grünen Signals. Wird dieser Gleisabschnitt von einem Schienenfahrzeug befahren, so wird der Signalstrom über den widerstandsärmeren Weg, der Zugachsen und Räder geleitet. Folglich entsteht ein Achskurzschluss, wodurch das Signalrelais stromlos wird und abfällt. Damit leuchtet das rote Signal auf und der Abschnitt wird als besetzt gemeldet.

¹⁸ Technische Zugschlussmelder sind am letzten Wagen des Zuges angebracht und werden als technisch auswertbares Zugschlussignal verwendet. Somit wird der Besetztzustand, mit dem Passieren des Zuges am Ende des Freimeldeabschnitts, in den Freizustand überführt (Naumann, et al., 2004 S. 221).

¹⁹ Die Schienenstrecke wird in Teilabschnitte eingeteilt, die Blockabschnitte genannt werden.

Um der Gefahr vorzubeugen, dass bei einer Unterbrechung des Gleisstromkreises ein freier Abschnitt gemeldet würde, arbeitet der Gleisstromkreis in dem Ruhestromprinzip. Damit ist das Relais (Empfänger) im Freizustand aktiviert. Im Falle einer Störung wird demzufolge das Gleisrelais deaktiviert und der Streckenabschnitt als besetzt gemeldet. So kann man den gefährlichen Systemzustand „Gleisfreimeldung“ vorbeugen, der durch eine solche Stromkreisunterbrechung bei einem Arbeitsstromprinzip hervorgerufen würde. (Naumann, et al., 2004 S. 112 f.)

Die bedeutensten Komponenten des Gleisstromkreises sind:

- **Gleisrelais,**
- **Stromquelle und**
- **Isolierstöße**

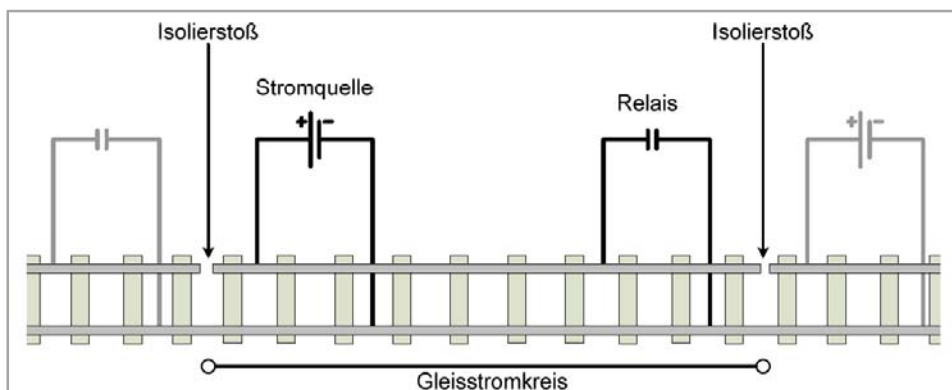


Abbildung 12: Aufbau eines einfach -isolierten Gleisstromkreises

Quelle: (Grimm, et al., 2005-09-19-20 S. 24)

3.4.1.2 Achszähler

Achszählkontakte (Schienenkontakte bzw. Zählpunkte) werden paarweise am Anfang und am Ende des Gleisabschnittes montiert (vgl. Abbildung 13) und zählen die Anzahl der in diesen bestimmten Bereich ein- und ausfahrenden Eisenbahnachsen. Dabei spricht man auch von einer Achszähleinheit. Eine Dopplung der Schienenkontakte (je zwei Sender und Empfänger) ist notwendig, um ein richtungsselektives Ein- und Auszählen der Achsen zu gewährleisten und damit ein mehrfaches Zählen einer auf dem Kontakt pendelnden Achse zu verhindern. Nachdem der Zählvorgang beendet ist, werden die beiden Ergebnisse an die Achsenzählauswerteeinrichtung übertragen und hier auf Gleichheit geprüft. Stimmt die Zahl der eingezählten Achsen mit denen der ausgezählten überein, so wird der Abschnitt als „frei“

gemeldet. (Pachel, 2002 S. 64 ff.) In der Abbildung 14 ist dieser schematische Systemaufbau anhand des Beispiels eines Achsenzählers Az LM des Herstellers Alcatel veranschaulicht.

Achszählkreise bestehen aus den Komponenten (Maschek, 2007 S. 608):

- **Achszählkontakt**, der direkt am Gleis montiert ist und zur Erkennung der Räder und damit der Achsen dient,
- **Anschlusskasten am Gleis**, dieser ist für die Erzeugung der Zählimpulse zuständig, die aus dem gemessenen Signal abgeleitet werden,
- **Achsenzählauswerteinrichtung (AZA)**, der für die Zustandserkennung des Gleises verantwortlich ist, indem die Informationen mehrerer Zählpunkte zueinander in Beziehung gesetzt werden.

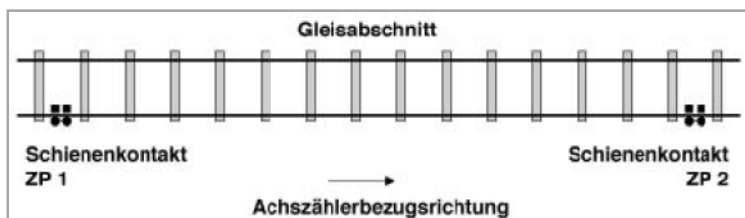


Abbildung 13: Prinzipielle Funktionsweise eines Achszählers

Quelle: (Signal + Draht (95), 2003 S. 18)

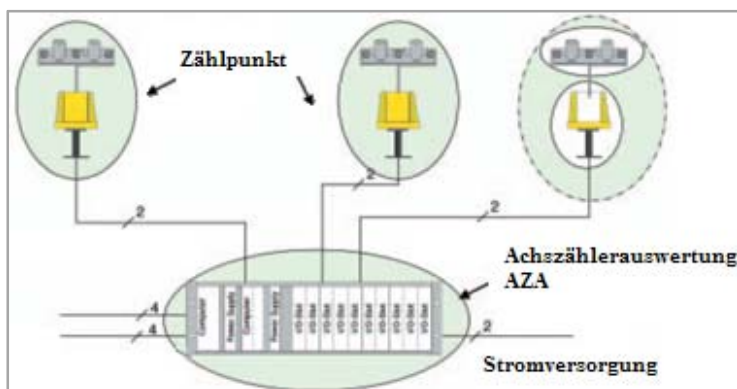


Abbildung 14: Systemaufbau eines Achszählers „Az LM“ der Firma Alcatel

Quelle: In Anlehnung an (Signal + Draht (95), 2003 S. 19)

3.4.2 Weichenantrieb

In der Abbildung 15 ist das Schema einer Weiche, mit den wichtigsten Konstruktionselementen dargestellt. Der Weichenantrieb ist für die Einstellung des Fahrweges, d.h. für das Umstellen der Weichen, verantwortlich.

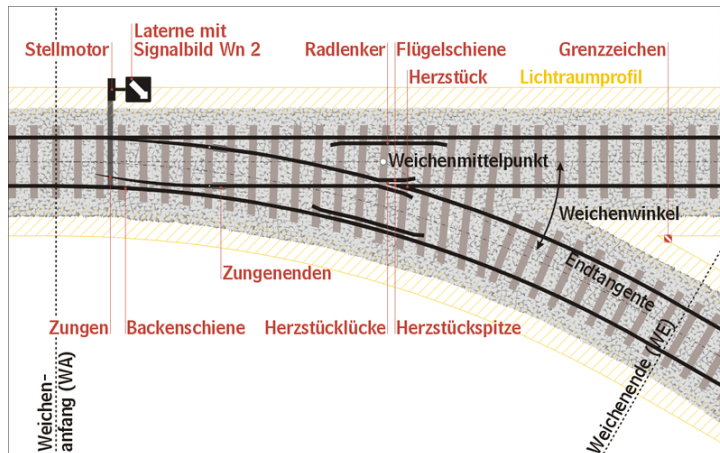


Abbildung 15: Schematische Darstellung einer Weiche

Quelle: (Wikipedia, 2008) unter detaillierter Prüfung der Angaben aus (Fiedler, 1999 S. 124 ff.)

Der Weichenantrieb ist ein „[...] elektrisch oder mechanisch ausgeführtes Antriebselement einer vom Stellwerk aus fernbedienten Weiche [...]“ (Naumann, et al., 2004 S. 235). Der Weichenantrieb besteht aus einer Stell- und einer Überwachungskomponente.

Die Komponenten des Weichenantriebs befinden sich meist in einem Graugussgehäuse mit verschleißbaren, feuerverzinkten Stahlblechdeckel, wobei für Instandhaltungsarbeiten eine gute Zugänglichkeit gewährleistet wird (vgl. Abbildung 16/ 3). Bei einem elektromagnetischen Weichenantrieb werden die Weichenzungen durch einen Drehstrommotor mit Rechts- und Linkslauf über ein Getriebe und eine Rutschkupplung angetrieben. Bei einem elektrohydraulischen Weichenantrieb erfolgt die Stellung der Zungen ausgehend von dem Drehstrommotor über eine Pumpe und einem Hydrauliksystem mittels Stell- bzw. Zungenverbindungsstangen. Nachdem die Stellung der Weichenzungen erfolgte, werden ihre Zungenenden durch spezielle Kuppeleinrichtungen festgehalten. (Naumann, et al., 2004 S. 235)

Zur signaltechnisch sicheren Überwachung der Zungenendlagen wird der Weichenantrieb mit Weichenüberwachungs- und Prüferkontakten ausgerüstet. Bei deutschen Weichenantrieben sind diese Kontakte meist in dem Antriebsgehäuse eingebaut und somit erfolgt die

Überwachung der Zungenendlagen, indem diese Kontakte über Prüferstangen bzw. Prüferschieber mit den Weichenzungen verbunden sind. Befinden sich die Weichenüberwachungs- und Prüferkontakte nicht im Gehäuse, so erfolgt eine Endlagenprüfung mittels Druckkontakte an der Backenschiene. (Naumann, et al., 2004 S. 235)

Die Abbildung 16 zeigt einen Weichenantrieb des Herstellers Siemens aus verschiedenen Perspektiven am Gleis.

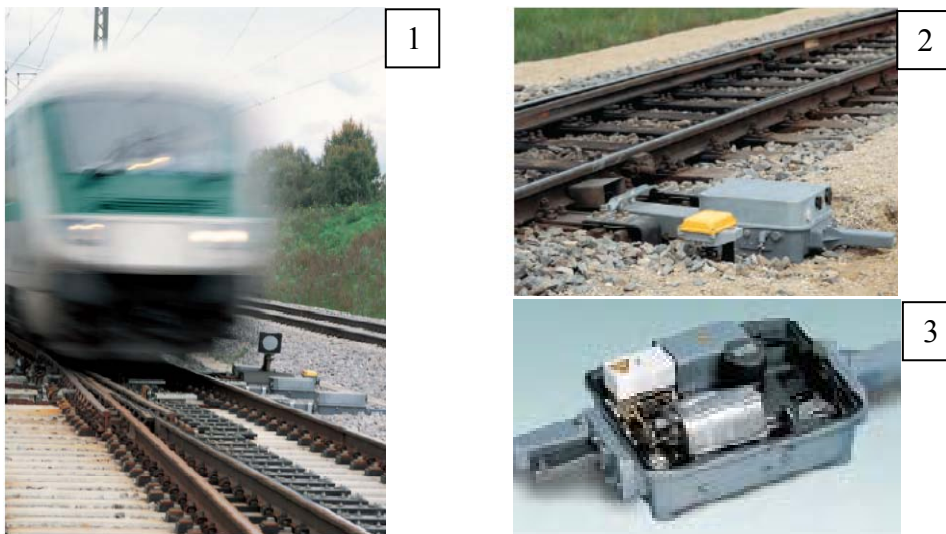


Abbildung 16: Weichenantrieb der Firma Siemens am Gleis

Quelle: (Siemens, 2006 S. 1 ff.)

Letztendlich sind die wichtigsten Komponenten des Weichenantriebes:

- **Drehstrommotor,**
- **Getriebe,**
- **Kontakte und**
- **Prüferstangen.**

3.4.3 Signal

Das Signal im Sinne eines Zeichens mit vereinbarten Inhalt, kann im Verkehrswesen in optischer, elektrischer oder akustischer Form realisiert werden. Mit der Verwendung von Signalen können Weisungen oder Genehmigungen erteilt werden, bzw. Meldungen oder Warnungen abgegeben werden. Zur eindeutigen Identifizierung der Form und der Bezeichnung eines Signals dient das Signalhandbuch, indem alle Signalbilder und Signalbegriffe beschrieben und damit für alle Beteiligten verbindlich sind. (Naumann, et al., 2004 S. 185) Bisher gibt es keine international einheitliche Festlegung für die Bedeutung und Auslegung der Signale. Für Deutschland gilt primär das Signalhandbuch der Deutschen Bahn AG, indem ESO (Eisenbahnsignalordnung) und Ausführungsbestimmungen (AB) zusammengefasst sind. Trotzdem sind Differenzierungen bei U- und Stadtbahnen zu berücksichtigen. (Fiedler, 1999 S. 191)

In diesen Betrachtungen sind optische Signale von Bedeutung, wie beispielsweise von den Betriebsstellen an das Triebfahrzeugpersonal zur Abwicklung des Zugverkehrs bzw. des Rangierverkehrs gegeben werden. (Naumann, et al., 2004 S. 185)

Zu den wichtigsten Komponenten bei dem System Signal gehört:

- der **Signalbildschirm** und
- die **Leuchtdioden** (incl. Elektronik und interne Verkabelung).

4 AnyLogic®- System Dynamics zur Optimierung von Instandhaltungsstrategien

4.1 Allgemeines zu AnyLogic®- System Dynamics

Den Grundstein von System Dynamics (SD) legte J.W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) in den USA vor ca. 40 Jahren. Die grundlegende Idee von System Dynamics basiert auf Rückkopplungsschleifen (Feedback-Loops), aus denen alle Entscheidungen in einem sozio- ökonomischen System getroffen werden. Darüber hinaus soll ein mathematisches Modell basierend auf der Analyse dieser Entscheidungsstrukturen aufgebaut werden können. Dieser Regelkreis der Entscheidungsprozesse kennzeichnet zum einen die Systemstruktur und zum anderen das dynamische Verhalten von System Dynamics Modellen. Somit versteht sich SD als eine Theorie zur Beschreibung von Struktur und Verhalten komplexer Systeme. (Schmidt, 1992 S. 107 ff.) AnyLogic^{®20} ist die Software, die die Methode System Dynamics umsetzt, um die Simulation der Modelle zu ermöglichen.

Das Ziel dieser Simulationstechnik besteht darin, auf verschiedenen Gebieten eine Reduzierung der Komplexität realer Systeme zu erreichen. Unter diesem Gesichtspunkt können mittels dieser Software die Ursachen- und Wirkungsbeziehungen realer Systeme quantitativ und qualitativ modellhaft dargestellt und simuliert werden. Dabei erfolgt eine Unterteilung des Gesamtsystems in Subsysteme, diese dann wiederum als eine Einheit bzw. System betrachtet werden können. In der Abbildung 17 sind die Ziele in Verbindung mit dem Einsatz von SD grafisch dargestellt. Als ein mögliches Anwendungsfeld für SD ist beispielsweise die Aufbereitung bzw. Strukturierung von Management- Entscheidungen zu nennen. (Schmidt, 1992 S. 108)

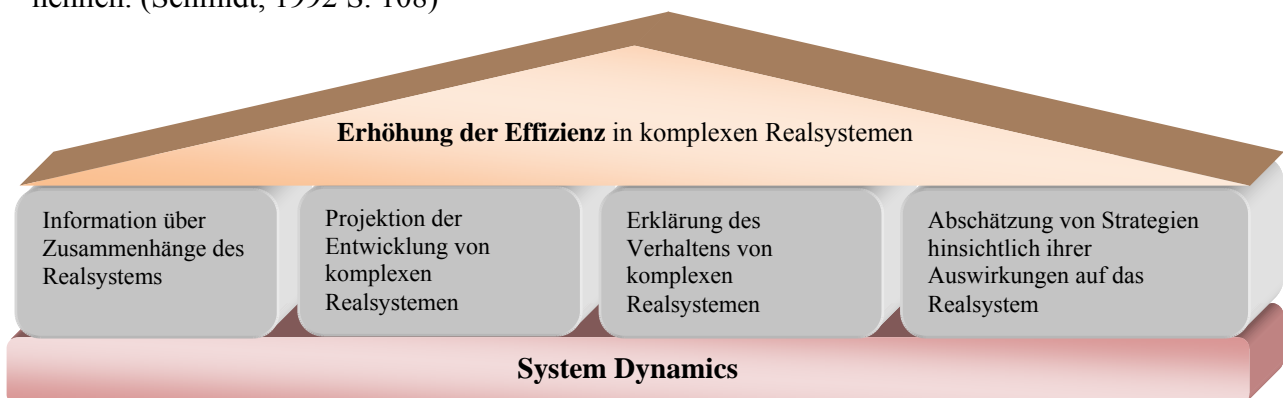


Abbildung 17: Ziele von System Dynamics Modellen

Quelle: In Anlehnung an (Schmidt, 1992 S. 109)

²⁰ Im Folgenden werden beide Begriffe gleichbedeutend verwendet.

4.2 Beschreibung der Objektstruktur

Nachfolgend soll zunächst ein Überblick über die grundlegenden komplexen Zusammenhänge des Unternehmensbereichs Instandhaltung bei der Deutschen Bahn AG gegeben werden. Auf Grund der hohen Komplexität, die die Entwicklung von Instandhaltungsmodellen bereithält, ist es jedoch absolut notwendig, einige Einschränkungen bezüglich der abzubildenden kausalen Zusammenhänge zu machen. Mit Hilfe dieser Einschränkungen erfolgt die Entwicklung der Modelle „bottom up“, das heißt von der kleinsten modellhaft abzubildenden Betrachtungseinheit, der Komponente bis zu dem übergeordneten LST- System.

4.2.1 Analyse grundlegender kausaler Zusammenhänge bei der Deutschen Bahn AG

Auf Grund einer Unternehmensanalyse der Deutschen Bahn AG wurden die wesentlichen kritischen Erfolgsfaktoren determiniert. Dabei wurde festgestellt, dass die Qualität des Leistungsangebotes, d.h. Fahrkomfort und Fahrsicherheit im Personenverkehr bzw. Vermeidung von Transportschäden im Güterverkehr eine hohe Bedeutung einnimmt. Weitere Erfolgsfaktoren sind Zeitaspekte, wie beispielsweise Minimierung der Reise- und Transportzeiten, Reduzierung von Verspätungen sowie der Erhöhung der Verfügbarkeit des Transportsystems und letztendlich der Preis des Leistungsangebotes. (Schmidt, 1992 S. 139)

Um diese Erfolgsfaktoren zu verstärken und somit einen höheren Marktanteil zu erzielen, ist ein optimiertes Instandhaltungsmanagement von entscheidender Bedeutung. Wie in dem nachfolgenden Kausaldiagramm (Abbildung 18) dargestellt ist, stehen die Instandhaltungsmaßnahmen im direkten Zusammenhang mit der Qualitäts- und Zeitkomponente des Angebotes der Deutschen Bahn AG. Bezüglich des dritten Erfolgsfaktors, Preis, ist eine Beziehung zwischen der Instandhaltung möglich, jedoch spielen vorrangig bei der Preisbildung der Deutschen Bahn AG andere Faktoren eine größere Rolle. (Schmidt, 1992 S. 139)

Der Fokus der folgenden Betrachtungen liegt auf der durch die Instandhaltung beeinflussbaren Qualitäts- und Zeitkomponente. Instandhaltungsmaßnahmen, die einerseits Störungen des Leistungsangebotes und damit Betriebserschwerernskosten verursachen, erhöhen auf der anderen Seite die Qualität der LST- Systeme, die sich wiederum auf einer größeren Sicherheit und einer höheren Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit) auswirkt. In diesem

Zusammenhang trägt eine effektive Instandhaltung einen unmittelbaren Anteil zur Verbesserung der Wettbewerbssituation der DB AG bei. (Schmidt, 1992 S. 140)

Das Basiskausaldiagramm (Abbildung 18) zeigt die komplexen Zusammenhänge des Unternehmensbereichs Instandhaltung. Darüber hinaus sind auch die Interdependenzen zu anderen unternehmensinternen und –externen Bereichen dargestellt. Die wichtigsten Sektoren des Kausaldiagramms sind: Kapazitätsmodul (rote Markierung), Marktanteilsmodul (blaue Markierung), Budgetmodul (grüne Markierung) und die Kosten- Umsatz und Erfolgsberechnung, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. (Schmidt, 1992 S. 140)

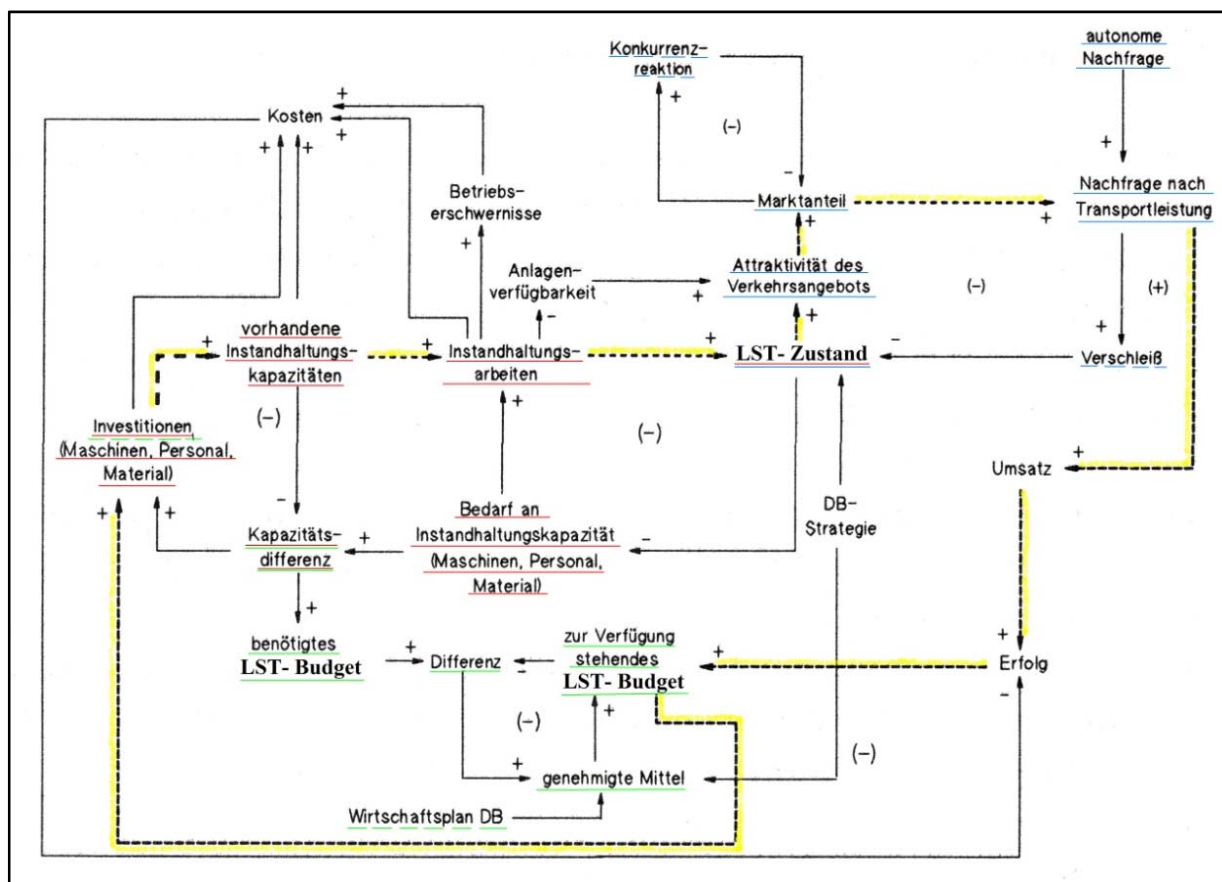


Abbildung 18: Basiskausaldiagramm: LST- Instandhaltung bei der Deutschen Bahn AG

Quelle: In Anlehnung an (Schmidt, 1992 S. 140)

Wie aus der exemplarischen Gegenüberstellung der LST- Komponenten und deren Abnutzungsparameter (vgl. Kapitel 3.3) bereits hervorging, ist der Verschleiß der LST-Komponenten bzw. Systeme zu einem überwiegenden Teil von der Streckenbelastung abhängig. Somit verursacht eine hohe Streckenbelastung einen erhöhten Verschleiß, dieser den Zustand des jeweiligen Systems der LST verschlechtert (*Kapazitätsmodul*, rote Markierung). Das hat ein Ansteigen der für die Instandhaltung benötigten Kapazitäten

(Maschinen, Personal, Material) zur Folge. Entsprechend dem zur Verfügung stehenden LST-Budget werden diese Mehraufwendungen angeschafft. Dadurch wird die vorhandene Instandhaltungskapazität erhöht und es sind mehr Instandhaltungsarbeiten möglich und eine bessere Qualität der LST- Systeme wird gewährleistet. In diesem Kausaldiagramm ist dargestellt, dass sich mit jeder Instandhaltungsmaßnahme die Anlagenverfügbarkeit verschlechtert, d.h. je öfters Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden, desto häufiger kommt es zu Fahrplanunregelmäßigkeiten und Verspätungen. Diese wirken sich negativ auf die Kundenzufriedenheit bzw. der Attraktivität des Verkehrsangebotes aus. Weiterhin rufen die vermehrten Instandhaltungsarbeiten erhöhte Betriebserschwerniskosten hervor, die die Gesamtkosten bei normalem Betriebsablauf erhöhen. (Schmidt, 1992 S. 141)

Das Marktanteilsmodul (blaue Markierung) ist aus Gesamtunternehmenssicht von enormer Bedeutung. Ausgehend von dem Zustand der LST- Anlagen bestimmt sich u. a. die Attraktivität des Verkehrsangebotes. Je höher die Attraktivität desto größer ist die Nachfrage und desto besser ist die Wettbewerbssituation der Deutschen Bahn AG. Das bringt zum einen höhere Umsätze mit sich aber auch höhere Belastungen des Streckennetzes, das sich in einem erhöhten Verschleißaufkommen und damit einen verschlechterten LST- Zustand widerspiegelt. Aus diesem Grund sind entsprechend höhere Instandhaltungsmaßnahmen notwendig. (Schmidt, 1992 S. 141)

Nachdem die aktuelle Instandhaltungskapazität aus dem Kapazitätsmodul ermittelt wurde, wird in dem Budgetmodul (grüne Markierung) das benötigte Budget berechnet. Diese Berechnung erfolgt in Abhängigkeit des Wirtschaftsplans und der unterstellten Unternehmensstrategie.

Die gelb markierten Pfeile stellen eine weitere positive Feedback- Loop dar. Diese Feedback- Loop zeigt, dass eine Verbesserung des LST- Zustandes die Marktattraktivität und damit den Marktanteil steigert. Das hat, unter Voraussetzung gleich bleibender Bedingungen, eine Erhöhung des Umsatzes und entsprechend des Unternehmenserfolgs zur Folge. Somit steigt das Instandhaltungsbudget und mehr Instandhaltungsarbeiten sind möglich, da mehr Kapazitäten angeschafft werden können.

4.2.2 Analyse der Wirkzusammenhänge einer LST- Anlagenkomponente

Das Basiskausaldiagramm aus dem vorherigen Kapitel dient primär der Veranschaulichung und der Einordnung der Instandhaltung in das unternehmerische Gesamtbild. Bei der Modellentwicklung konnte aus Gründen der hohen Komplexität nur auf das Kapazitätsmodul (rote Markierung) im Zusammenhang mit der Kostenberechnung eingegangen werden, das im Folgenden konkretisiert ist.

In der Abbildung 19 sind die Ursachen- Wirkungsbeziehungen einer Anlagenkomponente in der Leit- und Sicherungstechnik grafisch dargestellt. Jede modellhaft abgebildete Komponente (vgl. Kapitel 3.3) basiert auf diesem Kausaldiagramm.

Der Zustand einer Komponente wird in den Modellen durch den Abnutzungsvorrat²¹ abgebildet. Mit zunehmender Belastung, die je nach Komponente überwiegend von der Liegezeit bzw. der Anzahl der Zugüberfahrten pro Woche abhängig ist, steigt der Verschleiß. Damit sinkt der Abnutzungsvorrat. Je weiter sich der Zustand der LST- Komponente verschlechtert, desto stärker wächst die Ausfallrate. Eine hohe Ausfallrate hat eine hohe Ausfallwahrscheinlichkeit und somit mehr Ausfälle zur Folge. Da die Ausfälle zufällig²² eintreten, müssen sie mit der „Feuerwehrstrategie“ (ausfallbedingter Instandhaltungsstrategie) behoben werden. Das zieht einen erhöhten Teil an Kosten nach sich, da dieser Entstörungsvorgang nicht planbar ist. Demzufolge steigen die Kosten und die benötigten Personalressourcen. An dieser Stelle ist zu berücksichtigen, dass in den Modellen der Materialaufwand sowie der Personalaufwand bereits in den Kosten integriert ist und nicht als Einzelposition berücksichtigt werden. Der Personalbedarf wird in Personenwochen zusätzlich berechnet, um den Einsatz des zur Verfügung stehenden Fachpersonals besser planen zu können.

Nachdem der Entstörungsvorgang abgeschlossen ist, beträgt der Abnutzungsvorrat und damit der Zustand der LST- Komponente wieder 100%. In Abhängigkeit der verschiedenen modellhaft abgebildeten Strategien (vorbeugende und zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie) werden Wartungsmaßnahmen²³ durchgeführt. Diese erhöhen zum

²¹ Die Funktion des Abnutzungsvorrates wird in dem Kapitel 4.5.2 ausführlich beschrieben.

²² Die Ausfälle werden durch die Exponentialverteilung in AnyLogic® generiert (vgl. Kapitel 4.5.3).

²³ An dieser Stelle wurde die Annahme getroffen, dass die Instandhaltungsmaßnahmen (Wartungen) nur zu Zeiten durchgeführt werden, bei denen kein Schienenverkehr stattfindet, wie beispielsweise nachts. Somit haben hier die Instandhaltungsarbeiten keinen negativen Einfluss auf die Verfügbarkeit und es ergeben sich keine Betriebserschwerungskosten.

einen die Kosten und den Personalbedarf und zum anderen den Abnutzungsvorrat. Die Erhöhung des Abnutzungsvorrates hat gleichzeitig Einfluss auf die Ausfallrate, die mit jeder Wartung verringert wird. Damit sinkt nach jeder durchgeführten Wartung die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ausfalls, auf Grund des verbesserten Zustandes der LST- Komponente. Wie bereits in vorherigen Kapiteln erläutert wurde, zeichnen sich besonders die Komponenten und Systeme der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik durch sehr lange Nutzungsdauern (ca. 25 Jahre) aus. Aus diesem Grund werden die Wartungsmaßnahmen, je nach Komponente und Strategie, über die Lebensdauer mehrfach ausgelöst. Da es, auf Grund praktischen Erfahrungen unrealistisch ist, dass eine Wartung nach beispielsweise 10 Jahren die gleiche Erhöhung des Abnutzungsvorrates hervorruft wie die gleiche Wartung nach einem halben Jahr, wird von der wartungsspezifischen Erhöhung nach jeder durchgeführten Wartung 1% mehr abgezogen²⁴. Nach einem Austausch bzw. einer Entstörung (Neuanschaffung der Komponente) wird die Häufigkeit der durchgeführten Wartungen auf den Wert 1 zurückgesetzt und das Verfahren wird weiter fortgesetzt.

Erreicht der Abnutzungsvorrat die vordefinierte minimale Abnutzungsgrenze²⁵, so wird die LST- Komponente vorzeitig ausgetauscht. Hierbei entstehen wiederum Kosten für den Austausch mit gleichzeitigem Anstieg des Personalbedarfs.

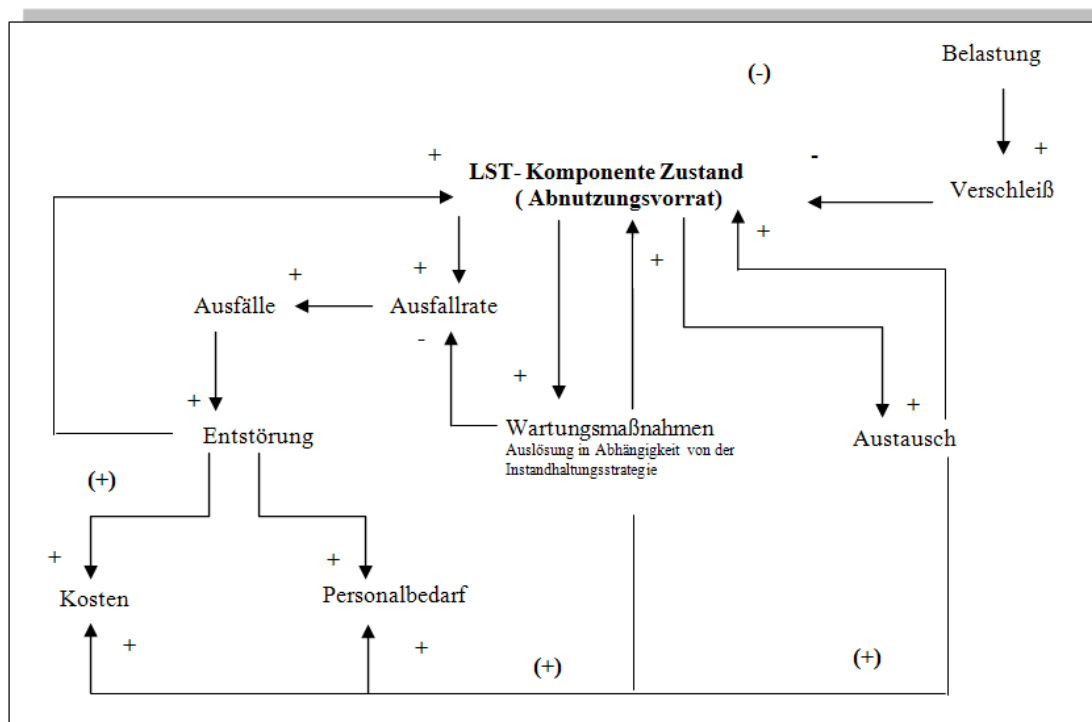


Abbildung 19: Ursachen- Wirkungsbeziehungen einer LST- Komponente

²⁴ Dieser Wert basiert auf einer Annahme, da es z. Z. keine wissenschaftlichen Quellen dazu gibt.

²⁵ In den Modellen wurde eine minimale Abnutzungsgrenze von 20% (0,2) angenommen.

Im Gesamtüberblick basieren alle Simulationsmodelle auf dem folgenden Schema (vgl. Abbildung 20). Es veranschaulicht die oben beschriebenen Zusammenhänge nach der VDMA und der Technischen Universität Braunschweig, die die Simulation von Instandhaltungs- und Ausfallkosten ähnlich aufgebaut haben. In der Darstellung (vgl. Abbildung 20) sind auszugsweise einige technische und organisatorische Einflussgrößen benannt, auf die u. a. in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

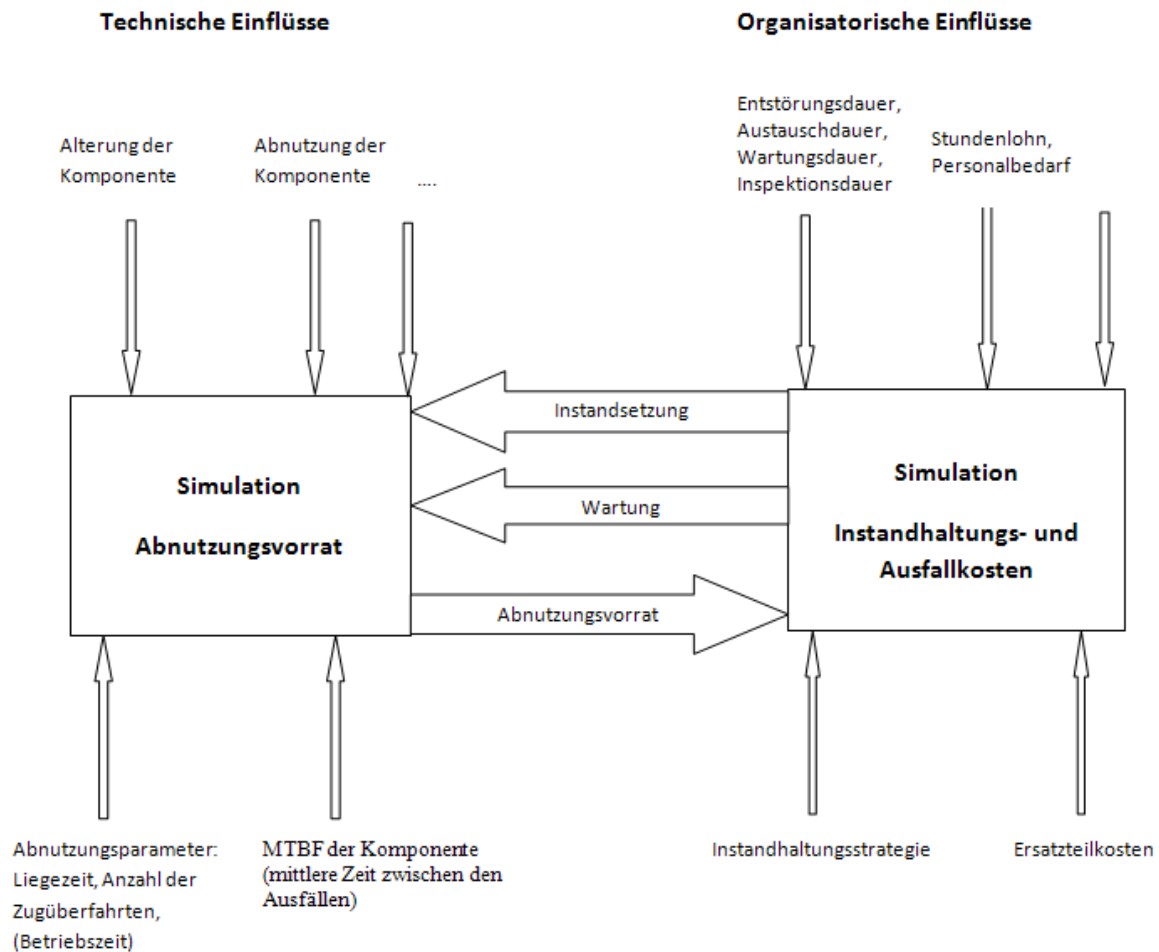


Abbildung 20: Basis Schema für die Simulationsmodelle

Quelle: In Anlehnung an (VDMA; IWF und PW - Technische Universität Braunschweig)

Einen kurzen Ausschnitt, wie der Abnutzungsvorrat im Zusammenhang mit den Instandhaltungs- und Ausfallkosten in AnyLogic® modelliert bzw. simuliert wurde, ist in der Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt²⁶. Die Diagramme basieren auf dem Modell der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie bezüglich Inspektionen (vgl. Kapitel 2.2.3 und

²⁶ Der Abnutzungsvorrat und die wöchentlich kumulierten Gesamtkosten werden absolut über die gesamte Modellzeit von 1200 Wochen (25 Jahren) berechnet und grafisch dargestellt.

4.6.2). Hier ist zu erkennen, dass innerhalb eines definierten Zyklus (48 Wochen) Inspektionen durchgeführt werden und in Abhängigkeit des Zustandes des Abnutzungsvorrates²⁷ (AV), zu diesen Zeiten, bestimmte Wartungsmaßnahmen erfolgen (vgl. Kapitel 4.6.2 - zur programmtechnischen Erklärung). Diese Wartungsmaßnahmen²⁸ verbessern den Zustand der Komponente und verursachen somit in der Grafik (vgl. Abbildung 21) eine Erhöhung in Y-Richtung. Nach ca. 600 und ca. 1200 Modellwochen erreicht der Abnutzungsvorrat dieser Komponente (Leuchtdiode) die vordefinierte Sicherheitsgrenze von 0,2 (20%). Hier erfolgt, wie bereits erläutert, der Austausch der Komponente (Instandsetzung) und der AV wird demzufolge wieder auf 1 (100%) gesetzt. Die Instandhaltungsmaßnahmen (Inspektionen, Wartungen) sowie die Instandsetzungsmaßnahmen (Austausch) sind in der Abbildung 22, durch jeweils bestimmte Erhöhungen der Gesamtkosten, erkenntlich.

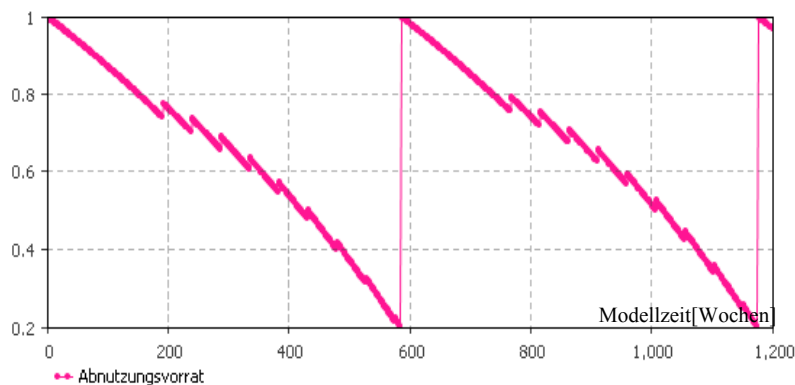


Abbildung 21: Simulationsausschnitt aus AnyLogic® - Funktion des AV

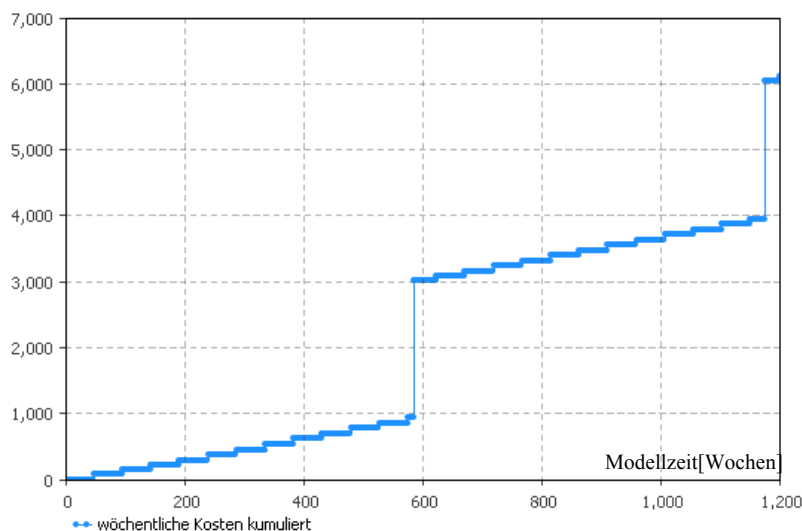


Abbildung 22: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®: gesamte IH- Kosten

²⁷ Im Vorfeld wurden AV- Grenzen bestimmt, zu denen die notwendigen Wartungen ausgelöst werden.

²⁸ Ausschließlich Wartungen können den Zustand der Betrachtungseinheit verbessern. Inspektionen dienen nur zur Bestimmung des AV. (vgl. Kapitel 2.2.3, 4.6.2)

Da in allen Modellen auf der Komponentenebene die Berechnung der Kosten und des Personalbedarfs auf die gleicher Art und Weise durchgeführt wird, werden an dieser Stelle die verwendeten Formeln beschrieben.

Kostenberechnung:

Die Kosten werden zum einen über die gesamte Nutzungsdauer²⁹ kumuliert und zum anderen pro Jahr³⁰ berechnet. Für jede Instandhaltungsmaßnahme (Inspektion, Wartung, Entstörung, Austausch) werden die folgenden Parameter definiert:

- Fixen Kosten (Transportkosten) [€] K_{fix}
- Materialkosten [€] K_{Material}
- Anzahl des Personals AnzPersonal
- Personalstundensatz [€] PersoStundensatz
- Dauer der Instandhaltungsmaßnahme [h] $\text{Dauer}_{\text{IHM}}$

Die anfallenden Kosten werden nach der Formel:

$$K = K_{\text{fix}} + K_{\text{Material}} + (\text{AnzPersonal} * \text{PersoStundensatz} * \text{Dauer}_{\text{IHM}}) \quad (2)$$

berechnet.

Berechnung des Personalbedarfs:

Mit jeder durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme wird Personal benötigt. Dieser Personalbedarf wird pro Woche berechnet und demzufolge über 25 Jahre (1200 Wochen) dargestellt. Der Personalbedarf wird in Personenwochen nach der Formel:

$$\text{PW} = \frac{\text{AnzPersonal} * \text{Dauer}_{\text{IHM}}}{\text{Arbeitswoche}} \left[\frac{\text{h}}{\text{Woche}} \right] \quad (3)$$

berechnet. Wobei eine Arbeitswoche mit 5 Tagen mit je 8 Arbeitsstunden definiert ist.

²⁹ Nach AfA- Tabelle (Bundesministerium der Finanzen, 2000) beträgt die Nutzungsdauer der LST-Komponenten im Durchschnitt 25 Jahre.

³⁰ Festlegung: 1 Jahr entspricht 48 Wochen; 1 Monat entspricht 4 Wochen; 1 Jahr entspricht 12 Monate

4.2.3 Analyse eines LST- Anlagensystems

Wie im Abschnitt 3.3 bereits erläutert wurde, werden die Systeme basierend auf den zugehörigen Komponenten modellhaft abgebildet. Die Abbildung 23 veranschaulicht diesen Zusammenhang am Beispiel des Gleisstromkreises, der modellhaft aus den Komponenten Isolierstöße, Gleisrelais und Stromquelle besteht.

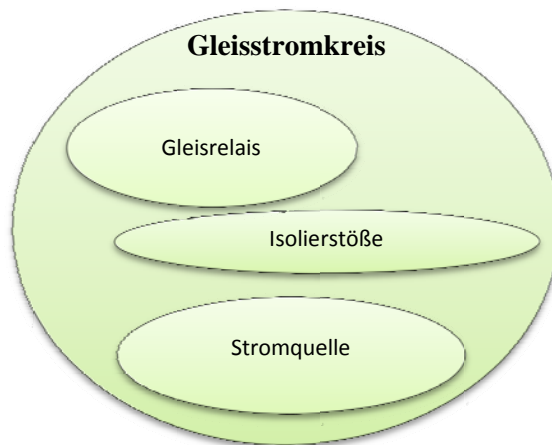


Abbildung 23: System bestehend aus Komponenten

Das Ziel der Modelle auf Systemebene besteht darin, die gesamten Systemkosten und den gesamten System- Personalbedarf zu bestimmen. Dementsprechend werden diese Daten für jede durchgeführte Instandhaltungsmaßnahme aufsummiert. Dabei können auf dieser Ebene erstmalig fixe Kosten³¹ gespart werden, wenn Wartungen bzw. Inspektionen mehrerer Komponenten gleichzeitig ausgelöst werden. In diesem Fall gehen nur die höchsten fixen Kosten einmalig in die Berechnung ein (vgl. Kapitel 4.7.2).

Entsteht ein Systemausfall, so werden zu den auf der Komponentenebene anfallenden Entstörungskosten zusätzliche Opportunitätskosten auf der Systemebene angesetzt. Diese Opportunitätskosten, auch als Betriebserschwerniskosten (BEK) bezeichnet, beinhalten grundsätzlich Verspätungskosten durch den Baustellenbetrieb, Kosten für Zugumleitungen, Kosten für Schienenersatzverkehr und externe Kosten. (EI - Eisenbahningenieur (54), 2003 S. 59) Je nach Art und Dauer der Entstörung können eventuell auch weitere Kosten auftreten. In den Simulationsmodellen werden die Opportunitätskosten nach der Formel:

$$\text{Opportunitätskosten} = \text{Entstörungsdauer(Komponente)} * \text{Ausfallkosten pro Minute} \quad (4)$$

³¹ Fixe Kosten werden durch die Wegekosten, d.h. die anfallenden Fahrtkosten (bis zu dem jeweiligen LST-System) definiert.

berechnet. Wobei die Entstörungsdauer von der bzw. den ausgefallenen Komponenten abhängig ist. Die Ausfallkosten werden hier mit 15€³² pro Minute angesetzt.

Bei der Erstellung der Modelle wurden Redundanzen³³ und Replikationen³⁴ von Komponenten berücksichtigt. Das heißt, ein Systemausfall kann nur eintreten, wenn eine nicht redundante Komponente des Systems ausfällt bzw. wenn mehr Komponenten der gleichen Art ausfallen als Redundanzen vorhanden sind. In den nachfolgenden Untersuchungen wurden Systeme ohne Redundanzen und mit nur einer Replikation vorgesehen.

Letztendlich werden die Systemkosten nach der Formel:

$$\text{Systemkosten} = \sum_{n=1}^i K_n - K_{\text{fix}} + K_{\text{Opp}} \quad (5)$$

mit

K_n ... Instandhaltungskosten für die n-te Komponente,

K_{fix} ... fixe Kosten und

K_{Opp} ... Opportunitätskosten

berechnet. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Systemkosten über den gesamten Abschreibungszeitraum (25 Jahre) aufsummiert werden.

Gleichermaßen wie die Systemkosten wird auch der System- Personalbedarf nach jeder Instandhaltungsmaßnahme aufsummiert. Dieser wird jedoch wie auf Komponentenebene in Personenwochen berechnet und damit wöchentlich (über 1200 Wochen) aufsummiert. Somit sind die Personalressourcen besser planbar und Über- bzw. Unterkapazitäten lassen sich besser erkennen.

³² 15€ pro Verspätungsminute ist ein, aus der Praxis der DB- AG, üblicher Preis für d. Regionalstreckenbereich.

³³ Als Redundanz bezeichnet man das „[...] Einfügen von Reserveelementen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit technischer Systeme[...]“. (Meyers Lexikonverlag, 2007)

³⁴ Replikationen bezeichnet man hier die Anzahl gleicher Komponenten in einem System. Befindet sich eine Komponente nur einmal in dem System, so entspricht die Replikation dieser Komponente den Wert 1.

4.2.4 Analyse eines LST- Netzes

Das Netz bildet einen weiteren äußeren Rahmen, indem es in diesen Modellen eine bestimmte Menge der beschriebenen Systeme umfasst. Die folgende Illustration (Abbildung 24) symbolisiert das Netz, bestehend aus den vier Systemen. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, sind die Systeme wiederum aus Komponenten aufgebaut, die hier nur auszugsweise dargestellt sind.

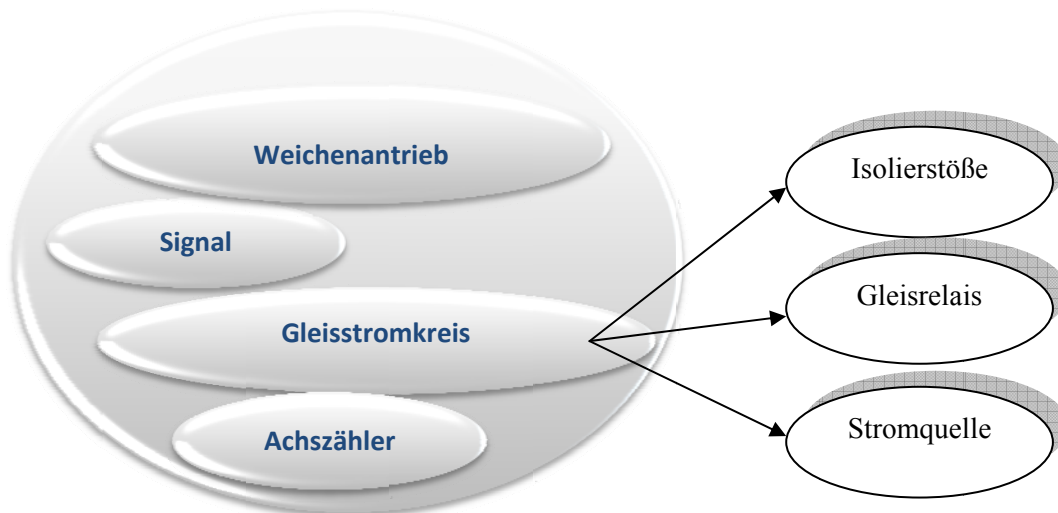


Abbildung 24: Netz bestehend aus Systemen

Die Netz- Zusammenfassung der Strecken innerhalb eines bestimmten räumlichen Abschnitts begründet sich in der erhöhten Übersichtlichkeit und in der gesteigerten Transparenz. Denn für räumlich beieinander liegende Systeme bzw. Komponenten sind Instandhaltungsmaßnahmen mit geringeren Aufwand durchführbar, da Wegekosten³⁵ gespart werden können. Somit wird für jedes Netz das Instandhaltungsbudget, das Instandhaltungsmaterial sowie das Instandhaltungspersonal zur Verfügung gestellt. In diesen Betrachtungen beinhaltet das Instandhaltungsbudget bereits den Material- und den Personalaufwand. Somit beschränken sich die Optimierungsrestriktionen auf das jährliche Instandhaltungsbudget und auf das zur Verfügung stehende Personal (Personenwochen). Die jährlichen Netzkosten errechnen sich aus der Summe der (optimierten) jährlichen Instandhaltungskosten aller Systeme. Der wöchentliche Personalbedarf errechnet sich aus der Summe des (optimierten) Personalbedarfs aller Systeme. Die Netzkosten bzw. der Netz-Personalbedarf wurde auf Basis der Optimierungsergebnisse errechnet.

³⁵ Wegekosten werden auf Netzebene modellhaft nicht berechnet, da die verschiedenen örtlichen Richtungen (Ost; Süd-Ost, etc.) schwierig zu quantifizieren sind.

4.3 Vorgehensweise zur Bestimmung von optimalen Instandhaltungsstrategien

Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 25) zeigt die angewandte Vorgehensweise um optimale Instandhaltungskosten bei konstanten oder verbesserten Zustand zu erreichen. Zunächst wurden in Abhängigkeit der Strategien (vgl. Kapitel 4.6) die

- Zyklen für die Wartungen (Zeitstrategie),
- Zyklen für Inspektionen und Wartungen (Zustandsorientierte Instandhaltung: „Inspektion“) und
- Werte des Abnutzungsvorrates (AV) für die Durchführung der Wartungen (Zustandsorientierte Instandhaltung: „Abnutzungsvorrat“)

auf Komponentenebene, mit dem Ziel der Minimierung der gesamten Instandhaltungskosten, optimiert. Diese Optimierungsklassen sind in den Modellen für jede Komponente funktionsfähig, jedoch wurde auf Grund des hohen Zeitaufwandes auf die Durchführung der Optimierungen der zehn Komponenten verzichtet. Idealerweise dienen in dem nächsten Schritt diese optimierten Zyklen bzw. Werte des Abnutzungsvorrates als Ausgangswerte für die Systemoptimierung. In den nachfolgenden Betrachtungen wird an dieser Stelle von der Konzernrichtlinie 892.xxxx der Deutschen Bahn AG bzw. von ergänzenden Annahmen ausgegangen.

Der Optimierungsalgorithmus³⁶ wird von AnyLogic[®] bereitgestellt. Dabei werden die Parameter in diskreten Abständen unter Angabe von minimalen und maximalen Grenzen variiert und für jede Variation (Iteration) wird intern das jeweilige zu Grunde liegende System (mit den Komponenten) ausgeführt. Da der Ausfall einer Komponente ein zufälliges Ereignis ist, wird die Ausführung des Systems mit jeder Variationsmöglichkeit zehnfach wiederholt. Aus diesen zehn Systemkosten wird anschließend der Mittelwert gebildet, der als Vergleichswert für weitere Optimierungsschleifen dient. Letztendlich ergibt sich aus der mehrfachen Berechnung mit den gleichen Parameterwerten der Vorteil, dass der Ausfall, als zufälliges Ereignis nicht über- bzw. unterbewertet wird.

³⁶ AnyLogic[®] greift bzgl. der Optimierung auf den „Optimizer OptQuest“ und auf das heuristische Optimierungsverfahren „Scatter Search, Tabu Search“ von Glover zurück. (AnyLogic- Help), (OptTek Systems, 2008)

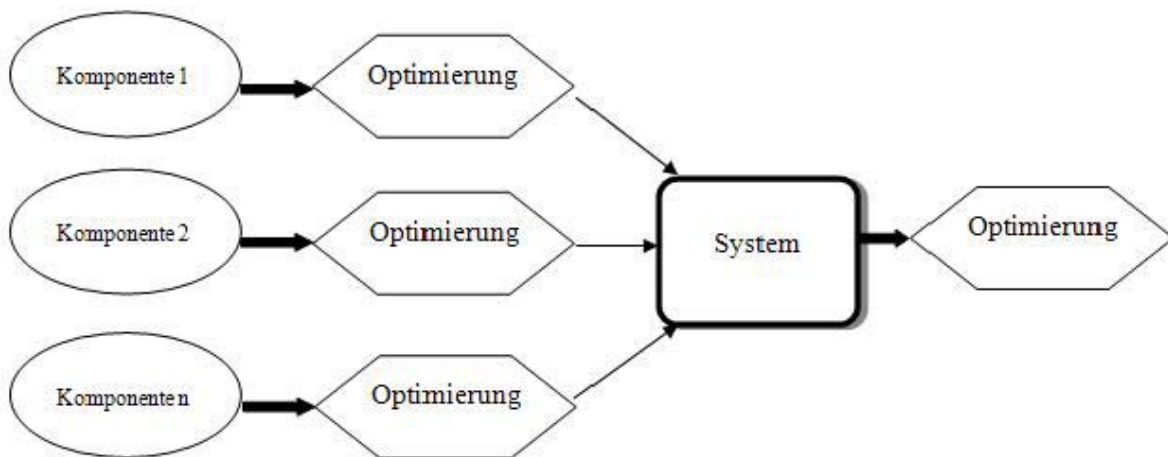


Abbildung 25: Vorgehensweise für Systemoptimierung

Nachdem alle Systeme optimiert wurden und damit die Zyklen bzw. die AV-Werte für minimale Instandhaltungskosten ermittelt wurden, erfolgt nun die Summation aller Systemkosten auf Netzebene (Netzkosten). Hierfür werden die gesamten und die jährlichen Kosten sowie deren zugehörigen Zyklen bzw. AV-Werte nach MS-Excel exportiert³⁷. Da sich die optimierten Netzkosten Restriktionen bzgl. jährliches Instandhaltungsbudget und Personenwochen unterziehen müssen, ist es sinnvoll, eventuell auf die zweitbeste Lösung eines oder mehrerer Systeme abzuweichen. So könnte beispielsweise die Lösung mit den geringsten Netzkosten nicht realisiert werden, wenn die umfangreichsten Wartungen zusammengelegt wurden, wodurch man auf der einen Seite Einsparungen erzielte, jedoch auf der anderen Seite nicht genügend Personal zur Verfügung steht. In einem solchen Fall müsste man von einem oder mehreren Systemen auf die zweitgünstigste Lösung abweichen. Dadurch würden zwar die gesamten Netzkosten steigen, jedoch wäre diese Lösung eventuell unter diesen Restriktionen realisierbar.

Da hier von vier Systemen ausgegangen wird, eröffnen sich 16 Variationsmöglichkeiten bzgl. der Kombination zwischen dem Optimum und der zweitbesten Lösung, welche in MS- Excel berechnet wurden.

³⁷ Zur besseren Aufbereitung und Kommunikation der Ergebnisse wurde an dieser Stelle MS- Excel verwandt.

4.4 Beschreibung mathematischer und physikalischer Zusammenhänge

4.4.1 Ausfallwahrscheinlichkeit

„Das Auftreten eines Ausfalls im Zeitintervall $[0, t]$ kann mit einer Funktion $F(t)$, die als Ausfallwahrscheinlichkeit oder Ausfallverteilungsfunktion bezeichnet wird, beschrieben werden.“ (Fritz, 2001 S. 5) Je länger die Komponente in Benutzung ist, d.h. je größer die Lebensdauer τ , desto größer ist die Ausfallwahrscheinlichkeit. Mathematisch ist die Ausfallwahrscheinlichkeit definiert als:

$$F(t) = P(\tau \leq t), \quad (6)$$

mit der Einschränkung, dass die Lebensdauer τ nicht größer als die Zeit t ist.

Die Zufallsgröße τ kann von 0 bis $+\infty$ variieren. Somit steigt auch die Ausfallverteilungsfunktion monoton im Intervall $F(0) = 0$ bis zu $F(\infty) = 1$. (Fritz, 2001 S. 5)

4.4.2 Überlebenswahrscheinlichkeit/ Zuverlässigkeit

Die Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. die Zuverlässigkeit R (engl. Reliability) ist definiert als „die Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit oder ein Bauteil oder ein System, während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“ (Fritz, 2001 S. 5)

Die Zeitdauer ist eine positive Zufallszahl, die auch als Lebensdauer τ bezeichnet wird. Wobei anstatt der Zeitdauer auch andere Lebensdauermerkmale wie beispielsweise der Laufleistung in km, angegeben werden kann. (Fritz, 2001 S. 5) Jede Belastung eines technischen Produktes führt zu minimalen Beschädigungen, die die Lebensdauer nach und nach reduziert, bis es zum Ausfall kommt. (Schüppenhauer, 2003 S. 19)

Die Zuverlässigkeit wird auch als Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet und umfasst das Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$R(t) = P(\tau > t) = 1 - F(t) \quad (7)$$

Auf Grund der eindeutigen Definition einer Betrachtungseinheit als funktionsfähig oder als ausgefallen, können die Wahrscheinlichkeiten $R(t)$ und $F(t)$ addiert werden. Die Summe ergibt 1.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (8)$$

Das bedeutet die Betrachtungseinheit kann entweder vor Ende des Nutzungsdauer mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ausfallen oder das Ende der Nutzungsdauer mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überleben. (Fischer, 1984 S. 19)

4.4.3 Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte

„Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zur Zeit t , bezogen auf ein kleines Zeitintervall dt , bzw. die Änderung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Einheit zum Zeitpunkt t .“ (Fritz, 2001 S. 6) Sie ist mathematisch die erste Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \text{ für } t \geq 0 \quad (9)$$

aufgrund des Zusammenhanges:

$$F(t) = 1 - R(t) \text{ ist} \quad (10)$$

$$\frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \text{ somit ist} \quad (11)$$

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (12)$$

Das heißt die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt t Teile ausfallen. Im Vergleich zur Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt t bereits Teile ausgefallen sind.

4.4.4 Ausfallrate

Die Ausfallrate $\lambda(t)$ beschreibt die „Anzahl der Ausfälle in einem Zeitintervall dt , bezogen auf die Anzahl der zum Zeitpunkt t noch intakten Einheiten.“ (Fritz, 2001 S. 6) Der mathematische Ausdruck für die Ausfallrate ist demzufolge die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ im Verhältnis zur Zuverlässigkeit $R(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (13)$$

Somit kennzeichnet die Ausfallrate das Risiko, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt t ein Teil ausfällt, unter der Prämisse, dass es bis zu diesem Zeitpunkt t überlebt hat. Insgesamt betrachtet gibt die Ausfallrate die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Betrachtungseinheit in zu einem bestimmten Zeitpunkt t innerhalb eines Zeitintervalls dt ausfällt, wenn sie bereits die Zeit t ausfallfrei überlebt hat. (Fritz, 2001 S. 6), (Fischer, 1984 S. 21)

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt erläuterten Beziehungen kann der Zusammenhang zwischen der Ausfallrate $\lambda(t)$, der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$, der Zuverlässigkeit $R(t)$ und der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ bewiesen werden.

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{1-F(t)} = - \frac{R'(t)}{R(t)} \quad (14)$$

Damit kann die Zuverlässigkeit der Betrachtungseinheit von jeder dieser Größe vollständig beschrieben werden und darüber hinaus sind diese Größen jeweils voneinander herzuleiten. (Fischer, 1984 S. 21 ff.)

Hierbei nimmt die Ausfallrate eine besondere Stellung ein, denn die Zuverlässigkeit erlangt erst dann praktischen Wert, wenn auch quantitative Aussagen gemacht werden können. Darüber hinaus stellt die Ausfallrate ein wichtiges Kriterium für die Auswahl einer optimalen Instandhaltungsstrategie dar. (Fischer, 1984 S. 23) Damit kommt der Ermittlung der Ausfallrate in der Praxis eine entscheidende Bedeutung zu.

Die Einheit der Ausfallrate ist $1/h$. Das heißt bei einer Ausfallrate von beispielsweise $\lambda = 10 \frac{1}{h}$ ist bei 10 Elementen innerhalb einer Stunde ein Ausfall zu erwarten. (Fischer, 1984 S. 23)

4.4.5 Mittlere Lebensdauer

Die mittlere Lebensdauer wird definiert als der Erwartungswert $E(\tau)$ der gesamten Lebensdauer τ einer Betrachtungseinheit. Das heißt, die mittlere Lebensdauer entspricht der mittleren Betriebszeit zwischen Beanspruchungsbeginn und dem Ausfall. (Fritz, 2001 S. 7) Der Erwartungswert $E(\tau)$ lässt sich mit Hilfe des Integrals über dem Produkt der Dichtefunktion und der Zeit bestimmen. Gleichmaßen kann die mittlere Lebensdauer durch das Integral über die Zuverlässigkeit $R(t)$ bestimmt werden, wie Fischer (1984) mathematisch beweist.

$$E(\tau) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (15)$$

Die mittlere Lebensdauer wird bei nicht reparierbaren Produkten als MTTF (*Mean Time To Failures*) und bei reparierbaren Produkten als MTBF (*Mean Time Between Failures*) bezeichnet. Unabhängig davon handelt es sich jedoch immer um die Betriebszeit zwischen den Ausfällen. (Schüppenhauer, 2003 S. 26)

Die Verfügbarkeit des reparierbaren Bauelements kann nun mit Hilfe der mittleren Lebensdauer MTBF und der mittleren Reparaturdauer MTTR (*Mean Time To Repair*) wie folgt berechnet werden:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (16)$$

(Schüppenhauer, 2003 S. 26)

4.4.6 Abnutzungsvorrat

Der Abnutzungsvorrat beschreibt den Zustand einer Betrachtungseinheit. Für die wiederherstellende Instandhaltung definiert Fischer den Abnutzungsvorrat AV, d.h. die zum Zeitpunkt t_i ungenutzte Abnutzungsreserve einer Betrachtungseinheit, als Fläche unter der Funktion der Zuverlässigkeit ($R(t)$), mit

$$AV = \int_0^{t_{max}} R(t) dt. \quad (17)$$

(Fischer, 1984 S. 229 ff.)

Die Weibullverteilung findet in der Zuverlässigkeitstechnik am häufigsten Anwendung. (Schüppenhauer, 2003 S. 23) Anhand dieser Verteilung definiert sich die Ausfallwahrscheinlichkeit nach:

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t^\beta} \quad (18)$$

(Abernethy, 2003 S. 2-3)

Berechnet man den Zustand einer Komponente auf Basis der Weibull- Verteilung, so berechnet sich der Abnutzungsvorrat AV nach:

$$AV = \int_0^{t_{max}} R(t) dt = \int_0^{t_{max}} (1 - F(t)) dt \quad (19)$$

$$AV = \int_0^{t_{max}} (1 - (1 - e^{-\alpha t^\beta})) dt \quad (20)$$

$$AV = \int_0^{t_{max}} e^{-\alpha t^\beta} dt \quad (21)$$

In dieser Funktion des Abnutzungsvorrates besteht eine mathematische Besonderheit, da die Lösung dieses Integrals ein erneutes Integral ergibt. Somit bestünde an dieser Stelle nur eine Möglichkeit in der Lösung dieser Funktion durch eine numerische Approximation.

4.5 Grundlegende Annahmen

Die Herausforderung bei der Entwicklung der verschiedenen Simulationsmodelle lag darin, die hohe Komplexität im Zusammenhang zwischen den technischen und den organisatorischen Einflussparametern einzuschränken. Dabei mussten jedoch gleichzeitig wichtige bestehende mathematisch- physikalische Abhängigkeiten erhalten bleiben. Mit Hilfe dieser Annahmen sind die erstmalig entwickelten Simulationsmodelle in sich konsistent. Für die Weiterentwicklung dieser Modelle ist es dennoch notwendig, diese Annäherungen besser zu spezialisieren bzw. durch genauere numerische Approximationen zu ersetzen.

4.5.1 MTBF

Die MTBF- Werte der Systeme basieren auf Herstellerangaben, wobei die MTBF- Werte der einzelnen Komponenten nicht mitgeliefert werden. Da die Simulationsmodelle jedoch auf Komponentenebene basieren, war es an dieser Stelle erforderlich eine Annäherung³⁸ (vgl. Gl. 22) zu formulieren, um von dem MTBF- Wert des Systems auf die MTBF- Werte der Komponenten schließen zu können.

$$\frac{1}{MTBF (System)} = \sum_{n=1}^i \frac{1}{MTBF (Komponente_n)} \quad (22)$$

Diese Gleichung stützt sich auf die Formel für die Ausfallrate eines Seriensystems (vgl. Gl. 23) und auf den bestehenden Zusammenhang zwischen MTBF und der Ausfallrate der durch die Formel (vgl. Gl. 24)

$$\lambda_{System} = \sum_{n=1}^i \lambda_n(t) \quad (23)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}, \text{ wenn } \lambda = \text{konst.} \quad (24)$$

(Färber, 2007) beschrieben wird. Darüber hinaus war an dieser Stelle zu berücksichtigen, dass die Modellzeit auf Wochen basiert, jedoch die MTBF- Werte (herstellerabhängig) meistens in Betriebsstunden angegeben werden. Aus diesem Grund erfolgten die Festlegungen:

1 Monat = 30 [Tage] * 20 [Betriebsstunden/ Tag] = 600 [Betriebsstunden] damit ist

1 Monat = 4 [Wochen]

1 Woche = 600 [Betriebsstunden] / 4 = 150 [Betriebsstunden]

³⁸ Bei der Ermittlung der MTBF- Werte der Komponenten wurden nur die beschriebenen Komponenten (vgl. Kapitel 3.3) berücksichtigt.

4.5.2 Abnutzungsvorrat

Da der Abnutzungsvorrat auf Basis der Weibullverteilung nicht einfach integrierbar ist (vgl. Abschnitt 4.4.6), wurde für die Zustandsbeschreibung die Formel für die Berechnung des Abnutzungsvorrates von Abeln, Hartman und Pitz (Abeln, et al., 2002 S. 14 f.) herangezogen. Diese Formel wurde ursprünglich für 123-kV-Leistungsschalter entwickelt, dient jedoch sehr gut als Annäherung an das vorliegende Problem.

Der aktuelle Abnutzungsvorrat berechnet sich aus der betrieblichen Abnutzung a_1 und des Einflusses der Alterung g . Abeln und Hartman definieren die Abnutzung durch die lineare Abnahme Δa innerhalb des Zeitraumes ΔT . Dabei wird dieser Quotient mit der zeitlichen Differenz zwischen der aktuellen Modellzeit t und dem Zeitpunkt der letzten Instandhaltung $T_{IH \text{ Vorgänger}}$ multipliziert und mit eins aufaddiert.

$$a_1 = - \frac{\Delta a}{\Delta T} (t - T_{IH \text{ Vorgänger}}) + 1 \quad (25)$$

Dieser betrieblichen Abnutzung wird von der exponentialverteilten Alterung überlagert. Abeln, Hartman und Pitz bestimmen die Abnutzung näherungsweise zum aktuellen Modellzeitpunkt t mit dem Alterungskoeffizienten τ mittels der Exponentialfunktion.

$$g = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (26)$$

Damit ergibt sich die Gleichung für den Abnutzungsvorrat zum jeweiligen Zeitpunkt t aus:

$$a = a_1 + g = - \frac{\Delta a}{\Delta T} * (t - T_{IH \text{ Vorgänger}}) - e^{-\frac{t}{\tau}} + 2 \quad (27)$$

(Abeln, et al., 2002 S. 14 f.)

In Abhängigkeit von dem Komponentenspezifischen Abnutzungsparameter (Liegezeit bzw. Anzahl der Zugüberfahrten) wurde diese Gleichung modifiziert und lautet wie folgt:

$$a = a_1 + g = - a_k * (kumLZ - LZ_{Austausch}) - e^{(t - LZ_{Austausch}) * t_k} + 2 + V \quad (28)$$

mit

a_k ... Abnutzungskoeffizient $\frac{\Delta a}{\Delta T}$;

kumLZ... kumulierte Liegezeit [Wochen];

$LZ_{\text{Austausch}}$... kumulierte Liegezeit seit dem letzten Komponentenaustausch [Wochen];

t ... Modellzeit [Wochen]

t_k ... Alterungskoeffizient $\frac{1}{\tau}$;

V ... Verbesserung des Abnutzungsvorrates nachdem eine Wartung erfolgte.

Die Liegezeit ist mit dem Wert 1 definiert. Das heißt, im Gegensatz zu dem Abnutzungsparameter Betriebszeit, bei dem andere Komponenten nur zu einem gewissen Prozentsatz des Tages in Nutzung stehen und abgenutzt werden, ist diese Komponente zu 100% des Tages in Benutzung.

Die Parameter Abnutzungskoeffizient und Alterungskoeffizient wurden für alle Komponenten zufällig gewählt, damit die AV-Kurve ohne Instandhaltungsmaßnahmen näherungsweise bei dem errechneten MTBF- Wert eine Nullstelle hat. Grundsätzlich besteht ein logischer Zusammenhang zwischen diesen Parametern a_k , t_k und dem MTBF- Wert. Dieser ist jedoch noch nicht eindeutig mathematisch quantifizierbar. Aus diesem Grund konnten hier nur Annahmen für die Parameter gemacht werden.

Die Errechnung des Abnutzungsvorrates von Komponenten, deren Abnutzung hauptsächlich von der Anzahl der Zugüberfahrten abhängig ist lautet wie folgt:

$$a = a_1 + g = -a_k \cdot (\text{kum}\ddot{U}F - \ddot{U}F_{\text{Austausch}}) - e^{(t - t_{\text{Austausch}}) \cdot t_k} + 2 + V \quad (29)$$

mit

a_k ... Abnutzungskoeffizient $\frac{\Delta a}{\Delta T}$;

kum $\ddot{U}F$... kumulierte Zugüberfahrten, d.h. die Konstant Zugüberfahrten pro Woche über die Modellzeit aufsummiert;

$\ddot{U}F_{\text{Austausch}}$... kumulierte Zugüberfahrten seit dem letzten Komponentenaustausch;

t ... Modellzeit [Wochen]

t_k ... Alterungskoeffizient $\frac{1}{\tau}$;

V...Verbesserung des Abnutzungsvorrates nachdem eine Wartung erfolgte.

Der konstante Parameter Zugüberfahrten pro Woche wurde bei allen betreffenden Komponenten mit 100 belegt³⁹.

Die Abbildung 26 veranschaulicht aus dem Simulationsmodell der Zeitstrategie den Abnutzungsverlauf der Leuchtdiode mit dem Abnutzungsparameter der Liegezeit. Die AV-Kurve weist in regelmäßigen Abständen bestimmte Erhöhungen in y- Richtung (AV-Verbesserungen) auf. Diese unterschiedlichen Erhöhungen sind die Folge von bestimmten Wartungsmaßnahmen und werden anhand der Formel:

$$\text{Verbesserung} = \text{Abnutzungsvorrat (t)} * \text{tatsächliche AV- Erhöhung (Anzahl der Wartungen)} \quad (30)$$

berechnet. Die tatsächliche AV- Erhöhung reduziert, wie zuvor im Kapitel 4.2.2 beschrieben, in Abhängigkeit der Häufigkeit der durchgeführten Wartungen, die wartungsspezifische AV- Erhöhung um jeweils 1%. Somit wird verdeutlicht, dass bei der n-ten Wartungsmaßnahme, die Komponente wesentlich älter ist und folglich diese Maßnahme nur einen geringeren Mehrwert haben kann, als die gleiche Wartung zu einem früheren Zeitpunkt. Da jedoch auch die n-te Durchführung einer Wartungsmaßnahme eine Verbesserung bewirkt, wurde eine minimale AV- Erhöhungsgrenze von 1% festgelegt.

Die tatsächliche AV- Erhöhung multipliziert mit dem Wert des Abnutzungsvorrates, zu dieser Zeit, ergibt die Verbesserung, die durch einen „Zacken“ in y- Richtung der AV- Kurve (vgl. Abbildung 26) verdeutlicht wird. Darüber hinaus ist, wie oben beschrieben, zu erkennen, dass eine Wartung in der 48. Woche eine weitaus höhere Verbesserung in y- Richtung aufweist (effektiver ist) als die gleiche Wartungsmaßnahme nach beispielsweise 12 Jahren (in der 624. Woche).

Ohne Wartungsmaßnahmen hätte diese Komponente eine Lebensdauer (MTBF- Wert) von ca. 580 Wochen. Mit diesen entsprechenden präventiven Wartungsmaßnahmen verlängert sich die Lebensdauer auf ca. 670 Wochen (vgl. Abbildung 26). Zu dieser Zeit erreicht der

³⁹ Die Anzahl 100 Zugüberfahrten pro Woche ist eine Annahme im Rahmen der Untersuchungen. Es wird vom Normalverkehr ausgegangen (vgl. Kapitel 3.2).

Abnutzungsvorrat die vordefinierte Sicherheitsgrenze⁴⁰ von 0,2 (20%) und die Komponente wird ausgetauscht. Der AV der neuen Komponente beträgt nun wieder 1 bzw. 100%.

Bei Eintritt des zufälligen Ereignisses des Ausfalls⁴¹ (hier nicht in der Abbildung dargestellt) wird der Abnutzungsvorrat für die Entstörungsdauer auf den Wert 0 gesetzt, d.h. die Komponente ist für diese Zeit außer Funktion. Nachdem der Entstörungsvorgang abgeschlossen ist, hat der AV wieder den Wert 1 (100%).

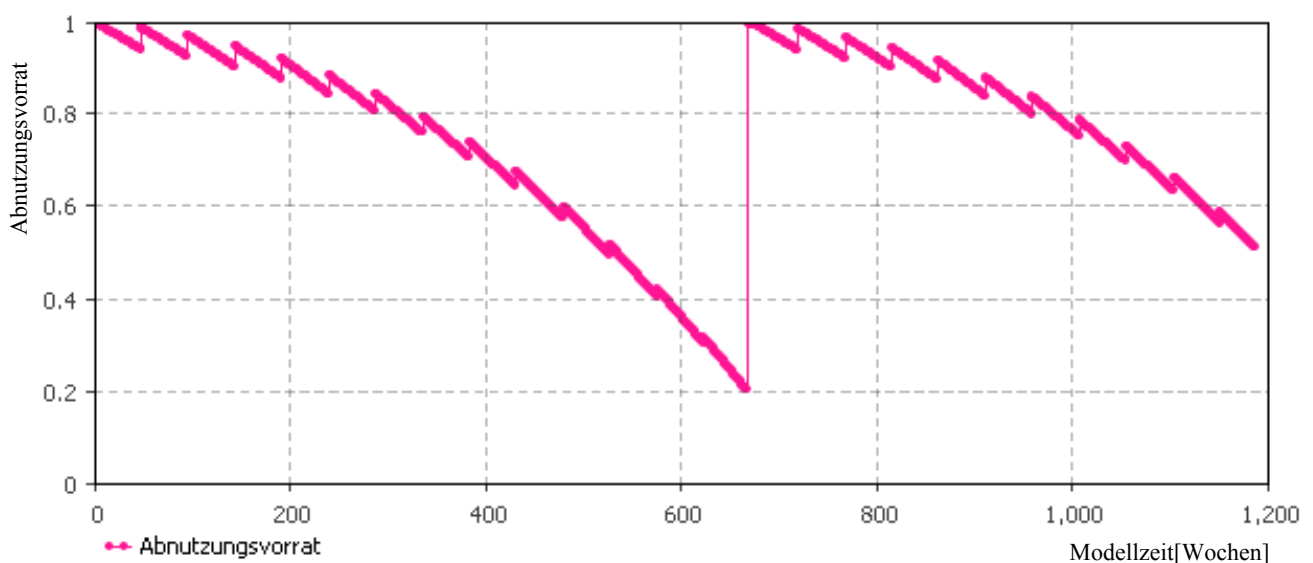


Abbildung 26: Abnutzungsvorrat der Leuchtdiode mit Instandhaltungsmaßnahmen

⁴⁰ Die Sicherheitsgrenze entspricht einer, für alle Modelle geltenden, minimalen Abnutzungsgrenze, die hier auf einer Annahme basiert (20% bzw. 0,2).

⁴¹ Das Eintreten von Ausfällen während der Simulation wird mit Hilfe des Events „Ausfall“ ausgelöst, dass auf Basis der Exponentialverteilung zufällig eintritt. Dieses Ereignis ist von der Software vordefiniert und ist von der Ausfallrate (vgl. Kapitel 4.5.3) abhängig.

4.5.3 Ausfallrate

Da in dem vorliegenden Modell der oben beschriebene Abnutzungsvorrat zu Grunde gelegt wurde, musste eine weite Annäherung⁴² bezüglich der Berechnung der Ausfallrate gemacht werden. Nur so konnte eine Konsistenz zwischen den physikalischen Gesetzmäßigkeiten annähernd gewährleistet werden. Die Formel für die Berechnung der Ausfallrate λ lautet:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF} * \text{Abnutzungsvorrat}(t)} \quad (31)$$

Der Vorteil dieser Annäherung liegt darin, dass nicht nur die ausfallbedingte Instandsetzung sondern auch die vorbeugenden Wartungen mit berücksichtigt werden. Damit führt beispielsweise eine durchgeführte Wartung zu einer Erhöhung des Abnutzungsvorrates und gleichzeitig zu einer Verringerung der Ausfallrate und damit zu einer Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit (vgl. Abbildung 27). Je weiter der Abnutzungsvorrat sinkt, desto weiter steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit. Entspricht der Abnutzungsvorrat den Wert 1 (100%), so beträgt die Ausfallrate das Reziproke des MTBF- Wertes.

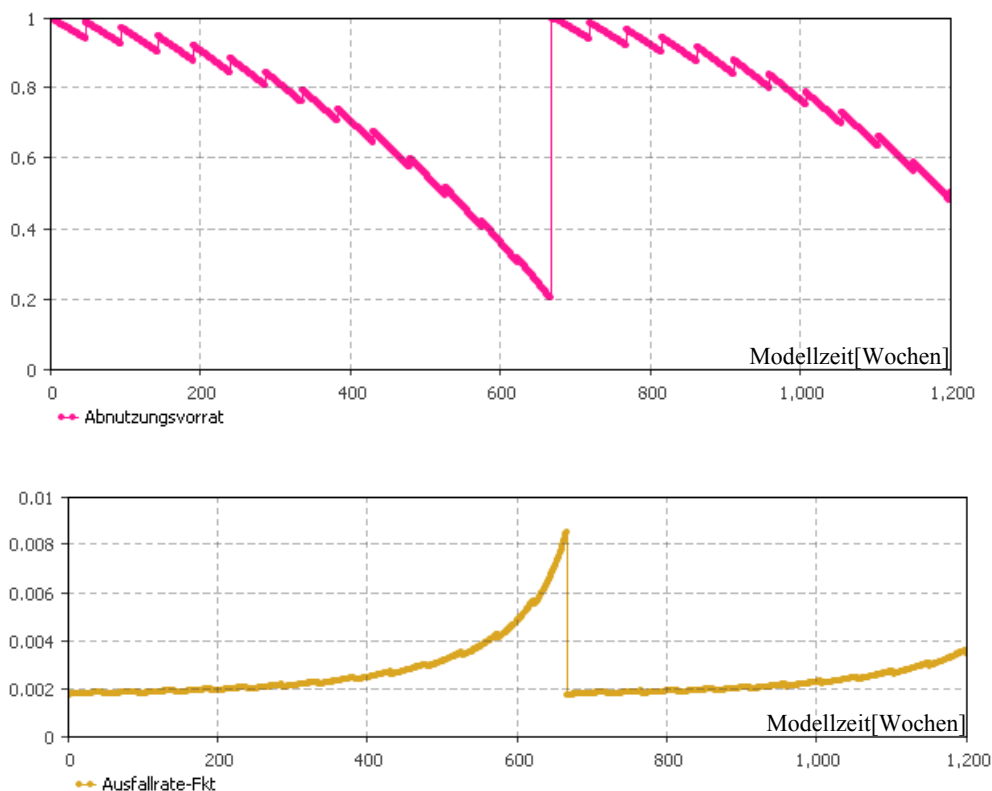


Abbildung 27: Ausfallrate der Leuchtdiode in Abhängigkeit vom AV und MTBF

⁴² Da die Funktion von Abeln, Hartman und Pitz (Abeln, et al., 2002 S. 14 f.) keine Verteilung ist, ist der Zusammenhang (vgl. 4.4.4, Gl. 14) zwar mathematisch erchenbar, jedoch ist das Ergebnis zu den tatsächlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten widersprüchlich.

4.6 Simulationsmodelle als Instrumente zur Planung und Gestaltung von komplexen Instandhaltungssystemen

Der Simulationsbegriff wird in der Literatur sehr unterschiedlich definiert. Beispielsweise definiert Schmidt die Simulation als eine „möglichst wirklichkeitsgetreue Nachbildung eines realen Geschehens.“ (Schmidt, 1992 S. 92) Darüber hinaus handelt es sich bei einem Modell nach Cardeneo „um eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“ (Cardeneo, 2005 S. 91) Für die Simulation eines realen Systems ist die mathematische Analyse von enormer Bedeutung. Diese Analyse stellt die Basis für simulationsorientierte Modellierung dar. Das typische Ziel einer Simulation von Systemen besteht in der Prognose und Optimierung eines Systemverhaltens sowie der Validierung eines geplanten Systems. (Fritz, 2001 S. 64)

Den grundsätzlichen Ablauf dieser Simulationsmodelle zeigt die Abbildung 28. Der erste Schritt der Simulation besteht in der Wertzuweisung der Parameter. Um die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten, wurden für alle gleichen LST- Komponenten und Systeme der drei Modelle dieselben Eingabeparameter (z.B. Wartungsdauer, -kosten, usw.) gewählt bzw. in Anlehnung an die Zeitstrategie entsprechende Werte (z.B. AV-Grenzen für zustandsorientierte Instandhaltung) berechnet. Somit kann die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse garantiert werden. Die Berechnung der Variablen erfolgt hauptsächlich durch Funktionen und Ereignisse (Events). Die Funktionen zeichnen sich dadurch aus, dass sie kontinuierlich über die Modellzeit bestimmte Werte errechnen (z.B. Funktion zur Errechnung des Abnutzungsvorrates, Ausfallrate). Im Gegensatz dazu treten die Ereignisse (Events) auf Grund von bestimmten Bedingungen ein und führen Sonderaktionen aus (z.B. Ausfall, Austausch, Entstörung, Wartung,...). Die Simulation ist beendet, wenn die Modellzeit den vordefinierten Wert von 1200 Wochen erreicht und alle Ergebnisse ausgegeben sind.

Die Software AnyLogic[®]- System Dynamics baut auf der objektorientierten Programmierung⁴³ auf. Das ermöglicht den einmaligen Aufbau einer Klasse „Komponente“

⁴³ Unter Verwendung der Programmiersprache Java.

für jede der drei Strategien⁴⁴. Diese Komponente wurde entsprechend mit den für sie spezifischen Parametern reproduziert und modifiziert. Die LST- Systeme wurden mit den zugehörigen Klassen der LST- Komponenten aufgebaut. Hier wurde der Vorteil der objektorientierten Programmierung effektiv genutzt, indem während der Simulation des Systems, gleichzeitig die Komponenten simuliert werden und diese die entsprechenden Daten (Instandhaltungskosten, Personalbedarf pro Woche) an das System direkt übergeben. Demzufolge müssen in den Klassen der Systeme nur noch die gesamten Kosten aller Komponenten sowie deren Personalbedarf berechnet werden (vgl. Kapitel 4.2.3 und Kapitel 4.6.4).

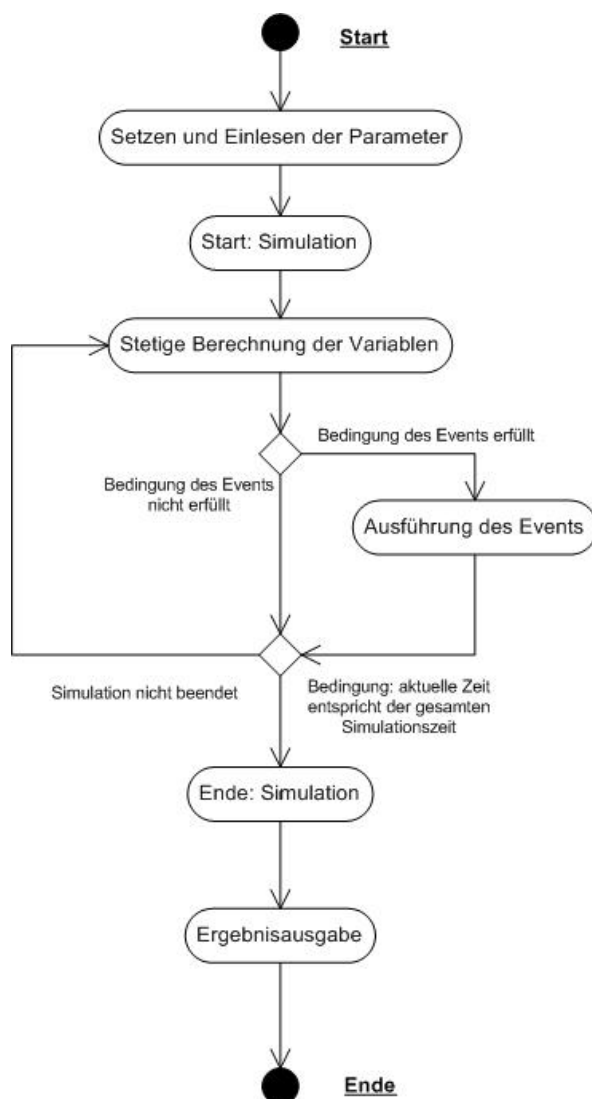


Abbildung 28: Darstellung des Simulationsablaufs (vereinfacht)

⁴⁴ Unter Berücksichtigung des Abnutzungsparameters, Liegezeit und Anzahl der Zugüberfahrten pro Woche.

Bevor auf die einzelnen Instandhaltungsmodelle eingegangen wird, soll zunächst in der folgenden Darstellung (vgl. Abbildung 29) ein kurzer Überblick, bezüglich der Simulation einer Komponente in AnyLogic[®] gegeben werden. In dem Simulationsausschnitt⁴⁵ sind die verschiedenen Elemente (z.B. Event, Variablen, Parameter, etc.) zu erkennen, deren allgemeine Bedeutung in der Tabelle 2 beschrieben ist. Anhand der Pfeile bezüglich des Abnutzungsvorrates, kann man erkennen, welche Variablen und Parameter in die Berechnung des Abnutzungsvorrates (Ursachen- Wirkungsbeziehung) eingehen. Gleichmaßen ist zu erkennen, welche Daten für die Berechnung der Variable „Ausfallrate_Lambda“ bedeutsam sind. Weitere mathematische Abhängigkeiten (z.B. innerhalb Funktionen und Ereignisse) werden von AnyLogic[®] nicht grafisch veranschaulicht.

Mit Hilfe von verschiedenen Data Sets (z.B. „VerschleißkurveDS“, „KostenDS“ und „PersoWochenDS“) werden zu jedem definierten Modellzeitschritt die entsprechenden Daten gespeichert, deren zeitlicher Verlauf (bis 1200 Modellwochen) in Diagrammen veranschaulicht werden kann.

Auf diese Weise kann genau untersucht werden, wann, welche Instandhaltungsmaßnahme (Wartung/ Inspektion) oder Instandsetzungsmaßnahme:

- welchen Einfluss⁴⁶ auf den Zustand der Komponente hat (AV- Kurve) sowie
- welche Kosten verursacht und
- wie viel Personal (Personalwochen) für die Durchführung benötigt wird.








Elemente	Erklärung
 Parameter	Veränderliche Eingangsgröße
 Flow Variable	Größe, die nicht zeitabhängig berechnet wird
 Stock Variable	Größe, die zeitabhängig berechnet wird
 Event	Ereignis, dass zyklisch, exponentialverteilt oder in Form einer Bedingung eintreten kann und eine Sonderaktion hervorruft
 Plain Variable	Variable, die während der Simulation stetig neu berechnet werden kann
 Data Set	Speichert Werte eines Elements (z.B. Variable, Function) innerhalb bestimmter Zeitintervalle, mit den dazugehörigen Modellzeiten
 „Pfeil“	Kennzeichnet Ursachen- Wirkungsbeziehung zwischen Elementen; Wird von AnyLogic [®] automatisch erstellt

Tabelle 2: Bedeutende Modell- Elemente in AnyLogic[®]

⁴⁵ Das Simulationsmodell zeigt die Komponente Leuchtdiode mit der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie: „Inspektion“ (vgl. Kapitel 4.6.2)

⁴⁶ Inspektionen haben keinen Einfluss auf den AV (vgl. Kapitel 4.6.2)

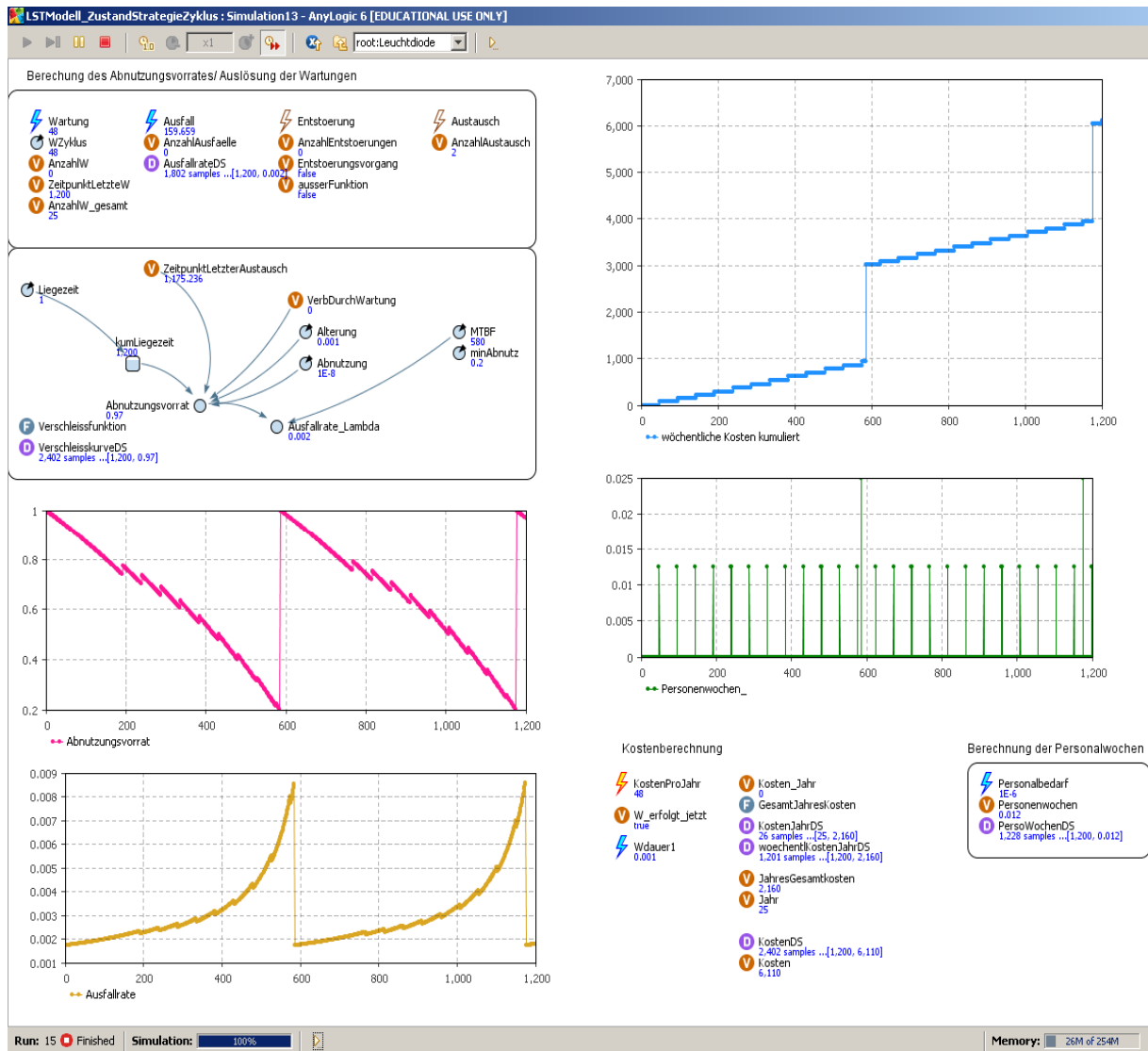


Abbildung 29: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®

Abkürzungen der Elemente und ihre Bedeutung

Abkürzung	Bedeutung
WZyklus	Wartungszyklus
AnzahlW	Anzahl der Wartungen
VerbDurch Wartung	AV- Verbesserung auf Grund einerWartungsmaßnahme
kumLiegezeit	Kumulierte Liegezeit
MTBF	Mean Time Between Failures
minAbnutz	Minimale Abnutzungsgrenze
W_erfolgt_jetzt	boolsche Variable: "wahr" während Wartungsvorgang
Wdauer	Wartungsdauer
PersoWochenDS	Personenwochen

Die bisher erklärten mathematisch- physikalischen Zusammenhänge, einschließlich der getroffenen Festlegungen, gelten für alle Simulationsmodelle. Nun werden in den nachfolgenden Unterpunkten die Hauptunterschiede in der Ausführung der Wartungsmaßnahmen auf Komponentenebene und auf Systemebene näher erläutert.

4.6.1 Zeitstrategie

Wie bereits im Kapitel 2.2.2 erläutert, werden bei der Zeitstrategie die Instandhaltungsmaßnahmen unabhängig von dem tatsächlichen Zustand der Komponente, nach fest von der Konzernrichtlinie 892.xxxx der DB AG vordefinierten Zeitintervallen durchgeführt. Dies wird mit Hilfe von zwei Events (Ereignissen) in AnyLogic®- System Dynamics realisiert. Zunächst überprüft das Ereignis „*AuslösungstestW*“ zyklisch im Abstand von einer Zeiteinheit⁴⁷, ob die aktuelle Modellzeit ein Vielfaches eines bestimmten Wartungszyklus entspricht. Fallen gleichzeitig mehrere Wartungsmaßnahmen zusammen, so wird die Wartungsmaßnahme mit dem größten Umfang ausgelöst, da diese die kleineren Maßnahmen mit beinhaltet. Falls eine Wartung ausgelöst werden kann, ruft dieses Event das Ereignis „*WartungW*“ auf und übergibt diesem die, für diese bestimmte Wartung⁴⁸, definierten Werte: Wartungsdauer, fixe Kosten, Materialkosten, benötigtes Personal, AV-Erhöhung und den Kostensatz für das Instandhaltungspersonal. Diese Werte sind uneindeutig einer spezifischen Wartungsmaßnahme zugeordnet.

Nachdem das Event „*WartungW*“ aufgerufen wurde, überprüft es zunächst ob zu dieser Zeit zufällig ein Ausfall eingetreten ist. Falls zu dieser Zeit ein Ausfall eingetreten ist, wird keine Wartung ausgeführt und das Event ist an dieser Stelle beendet. Ist kein Ausfall zu dieser Zeit eingetreten, werden die anfallenden Wartungskosten sowie der Personalbedarf⁴⁹ berechnet. Darüber hinaus wird die spezielle Erhöhung des Abnutzungsvorrates, in Abhängigkeit des Wartungsumfangs und der Anzahl der bisher durchgeführten Wartungen, (vgl. Kapitel 4.5.2) berechnet.

Da bei der zeitbasierten Instandhaltung Wartungen völlig unabhängig von dem tatsächlichen Zustand der Komponente durchgeführt werden, ist es theoretisch möglich, dass der Abnutzungsvorrat beispielsweise ca. 98% beträgt, wenn eine Wartung ausgelöst wird. Um zu vermeiden, dass der AV nach einer Wartung über 100% steigt, wurde eine maximale AV-Erhöhung festgelegt, die die Differenz zwischen 99,9% und den jeweils aktuellen AV beträgt. Somit kann der AV von ursprünglich 98% nach einer Wartung mit einer AV- Erhöhung von 5% nicht auf 102,9% steigen sondern auf max. 99,9%. Da die DB AG aktuell zeitbasiert instandhält, dient dieses Modell nachfolgend als Referenzmodell.

⁴⁷ Modellzeit beträgt Wochen

⁴⁸ Die Wartungen sind durch Klassen definiert, die modifiziert und repliziert wurden.

⁴⁹ Vgl. Kapitel 4.2.2 zur Berechnung der Kosten und Personenwochen.

4.6.2 Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie: „Inspektion“

Diese zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie (Inspektionsstrategie) zeichnet sich dadurch aus, dass in Abhängigkeit der jeweiligen Komponente eine Zuordnung der Inspektions- und Wartungsmaßnahmen⁵⁰ zu bestimmten AV- Grenzen⁵¹ im Voraus erfolgt. Darüber hinaus besteht ein wichtiger Bestandteil dieses Modells darin, dass Inspektionen bzw. Wartungen durch ein zyklisch auftretendes Event ausgelöst werden. Der Zyklus wird durch den Parameter⁵² „WZyklus“ angegeben.

Beträgt die Modellzeit ein Vielfaches des Parameters „WZyklus“ und findet genau zu dieser Zeit kein Entstörungsvorgang statt, so wird als erstes der Zustand des Abnutzungsvorrates überprüft. Ist der aktuelle AV zu dem Zeitpunkt einer Inspektion größer als die höchste AV-Grenze, so entstehen nur Inspektionskosten, d.h. Wegekosten (K_{fix}) und Personalkosten in Abhängigkeit der Dauer der Inspektion⁵³. Beträgt der AV zum aktuellen Modellzeitpunkt einen geringeren Wert als die höchste AV- Grenze, so wird entsprechend des Abnutzungsvorrates eine bestimmte Wartungsmaßnahme ausgelöst. An dieser Stelle wurde in diesem Modell eine Idealisierung vorgenommen, indem gleich nach der Messung und Auswertung des Zustandes der Komponente sofort eine entsprechende Wartungsmaßnahme ausgeführt werden kann.

Letztendlich besteht der Vorteil dieser Instandhaltungsstrategie darin, dass, auf Grund der Inspektionen nur notwendige Wartungsmaßnahmen durchgeführt werden. Demzufolge werden bei dieser Strategie, im Gegensatz zur Zeitstrategie, zu umfangreiche Wartungsmaßnahmen nie zu früh ausgelöst. Der Nachteil dieser Strategie besteht darin, dass der Zustand nur in diskreten Zeitabständen (geplante Inspektionen: „WZyklus“) gemessen wird. Somit ist die mögliche Anzahl der Wartungsmaßnahmen nur von dem definierten Zyklus abhängig, d.h. unabhängig von dem Zustand der Komponente. Dieser Nachteil wird in der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie: „Abnutzungsvorrat“ behoben (vgl. Kapitel 4.6.3).

⁵⁰ Inspektions- und Wartungsmaßnahme bestimmt: Dauer der Inspektion/ Wartung, Wartungsspezifische AV-Erhöhung, (AV- Erhöhung beträgt bei Inspektion den Wert Null), Wegekosten, Materialkosten, Anzahl des Personals, Personalstundensatz

⁵¹ Diese AV- Grenzen für die unterschiedlichen Wartungsmaßnahmen entsprechen der Formel (Gl.32, vgl. Kapitel 4.6.3) berechnet.

⁵² Parameterwahl des Zyklus entspricht dem kleinsten Wartungszyklus aus der Zeitstrategie (Referenzmodell).

⁵³ Die Inspektion umfasst hier allein die Zustandsmessung. Das heißt, die Inspektion hat keinen Einfluss auf den AV. Im Gegensatz dazu können Inspektionen bei der DB AG ggf. auch Kleinsmangelbeseitigung, Justieren oder Einstellen beinhalten.

4.6.3 Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie: „Abnutzungsvorrat“

Dieses Modell der zustandsorientierten AV- Strategie basiert auf der Voraussetzung, dass der Abnutzungsvorrat (Zustand) der Komponenten zu jeder Zeit bekannt ist. Das könnte beispielsweise anhand von Sensoren realisiert werden, die ständig den Zustand messen und mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnik die Daten zu den Büros der zuständigen Fachkräfte übertragen. Eine weitere vorstellbare Möglichkeit zur stetigen Bestimmung des Abnutzungsvorrates wäre, mittels einer mit Felddaten validierten Funktion, auf Basis der Weibullverteilung.

Bei dem Modell der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie bzgl. des Abnutzungsvorrates, sind die Wartungsmaßnahmen sowie die Anzahl der Wartungen von dem Zustand des Abnutzungsvorrates abhängig. Mit dem Simulationsstart wird zunächst anhand eines zyklisch ablaufenden Events „*Aktualisierung_Var*“ überprüft, zwischen welchen vordefinierten AV-Grenzen⁵⁴ sich der Abnutzungsvorrat gerade befindet. Dabei wird der Variable, die die aktuelle AV- Grenze beschreibt, der nächst kleineren AV- Wartungsgrenze⁵⁵ zugewiesen. Insgesamt werden auch bei diesem Modell, gleichermaßen wie bei den anderen Modellen maximal drei verschiedene Wartungsmaßnahmen definiert und damit maximal drei verschiedene AV- Wartungsgrenzen.

Die Bestimmung der AV- Wartungsgrenzen und der damit verbundenen Wartungsmaßnahmen⁵⁶ stützt sich primär auf den erreichten Zustand der betroffenen Komponente in dem Referenzmodell „Zeitstrategie“. Hier wurde ein Simulationslauf ohne Ausfall zu Grunde gelegt. Musste die Komponente während der gesamten Modellzeit nicht ausgetauscht werden, so beträgt die untere Grenze den AV- Wert zu $t=1200$ Modellwochen aus dem Referenzmodell. Erreichte die Komponente bereits vor Ablauf der gesamten Simulationszeit die Sicherheitsgrenze von 20%, so wird die untere Grenze mit dem AV- Sicherheitswert von 0,2 belegt. Gleichermäßen ist die Anzahl der Wartungsmaßnahmen von dem ausfallfreien Simulationslauf der Zeitstrategie abhängig. Liegt der Zustand der Komponente in der Zeitstrategie immer oberhalb der minimalen AV- Sicherheitsgrenze, so ist die Anzahl der verschiedenen Wartungsmaßnahmen gleich der, aus der Zeitstrategie, die aus

⁵⁴ Als „AV- Grenzen“ werden die absoluten Eingabeparameter benannt, bei denen eine bestimmte Wartungsmaßnahme ausgelöst wird, wenn der AV diesen Wert erreicht.

⁵⁵ Z.B. der AV beträgt 0,65 dann liegt die nächste Wartungsgrenze bei W_2 , wenn $W_1=0,8$; $W_2=0,5$; $W_3=0,3$; Austausch=0,2

⁵⁶ Die Anzahl der Wartungsmaßnahmen lehnen sich an die Lebensdauer (MTBF- Werte) der Komponenten.

der Konzernrichtlinie 892.xxxx für diese Komponente abgeleitet wurde. Ist die Lebensdauer (MTBF- Wert) der Komponente geringer als die Simulationszeit, so ist der Verlauf des Abnutzungsvorrates weitaus steiler. Aus diesem Grund ist es zweckmäßig die Anzahl der Wartungsmaßnahmen auf den maximalen Wert (drei) zu erhöhen. Letztendlich ist die Formel für die Herleitung der AV- Wartungsgrenzen:

$$AV_Wartungsgrenze_n = 1 - \frac{1 - \text{untere Grenze}}{(\text{Anzahl der Wartungsmaßnahmen} + 1)} * n \quad (32)$$

mit

n... Anzahl der Wartungsgrenze (im Intervall von 1 bis 3)

Parallel zu dem Event „Aktualisierung_Var“ wird das Ereignis „Wartung“ ausgeführt, wenn die Eintrittsbedingung:

WENN

1. Die Differenz zwischen dem aktuellen AV und der zu dieser Modellzeit geltenden AV-Grenze einer bestimmten Wartungsmaßnahme, kleiner oder gleich einer festgelegten Toleranz ist **UND**
2. Kein Austausch zu dieser Zeit stattfindet **UND**
3. Kein Ausfall zu dieser Zeit stattfindet **ODER**
4. Die boolesche Variable „WAusloesung⁵⁷“ ist wahr

erfüllt ist.

Dabei erfolgt zunächst eine weitere Prüfung bzgl. der Art und des Umfangs der Wartungsmaßnahme. Dazu wird die Funktion „AusloesungNaechsteW“ aufgerufen, die die zeitliche Differenz zwischen der aktuellen Modellzeit und dem Zeitpunkt der letzten Wartungsmaßnahme berechnet. Ist diese Differenz größer als ein vorgegebenes minimales Intervall oder wurde bisher keine Wartung ausgelöst, so wird der Wert „Wahr“ an das Event zurückgegeben. Damit wird zu diesem Zeitpunkt genau die notwendige Wartungsmaßnahme durchgeführt. Ist die Differenz zwischen der aktuellen Modellzeit und dem minimalen Intervall kleiner, so wird der Rückgabewert „Falsch“ an das Event übergeben. Damit wird jetzt diese Wartungsmaßnahme nicht ausgelöst und die aktuelle AV-Grenze rückt auf den nächst größeren Wartungsumfang, d.h. zu der nächst kleineren AV- Wartungsgrenze.

⁵⁷ Auf diese Variable wird nur im System zugegriffen, um eine Wartung einer Komponente verfrüht auszulösen um somit Wartungen mehrerer Komponenten zusammenlegen zu können. Dadurch kann man Wegekosten sparen (vgl. Kapitel 4.6.4).



Der Sinn des minimalen Intervalls begründet sich darin, dass der AV, bei einer durchgeführten Wartung, um einen bestimmten Wert steigt. Verläuft jedoch die Funktion des Abnutzungsvorrates sehr flach, so ist es angebracht, dieselbe Wartung nach einer gewissen Zeit wieder durchzuführen. Somit kann der Zustand der Komponente länger auf einem hohen Niveau gehalten werden. Dabei muss man berücksichtigen, dass der AV der Komponente mit zunehmendem Alter schneller sinkt. Das hat zur Folge, dass diese Wartung in immer kürzeren Abständen ausgeführt werden müsste. Um das zu vermeiden, wurde an dieser Stelle eine zeitliche Grenze definiert, die nicht unterschritten werden darf. Damit wird auch die Wirtschaftlichkeit dieser Strategie gesichert.

Im weiteren Verlauf des Wartungsereignisses werden, wie in den anderen Modellen, die zugehörigen Kosten und die Personenwochen berechnet (vgl. 4.2.2).

4.6.4 Instandhaltungsmodelle der LST- Systeme im Überblick

Wie im Kapitel 4.6 bereits beschrieben wurde, beinhalten die jeweiligen LST- Modelle, auf Grund der objektorientierten Programmiersprache, die zugehörigen Komponenten- Klassen. Die Abbildung 30 zeigt einen Ausschnitt des Simulationsmodells Achszähler (zustandsorientierte Instandhaltung: „Inspektion“), das aus den Komponenten Achszählkontakte, Anschlusskasten und Achszählauswerteeinrichtung (abgekürzt: Achszählauswertung) besteht (vgl. Kapitel 4.2.3). In der Klasse des Systems werden die modellspezifischen Parameter:

- Replikationen und
- Redundanz in Abhängigkeit der Strategie,
- Wartungszyklus (WZyklus_x) bei der Zeit- und Inspektionsstrategie und
- AV- Grenzen sowie die minimalen Zeitintervalle bei der AV- Strategie

für jede Komponenten- Klasse definiert und an die entsprechende Klasse während der Simulation übergeben. Die Simulation des gesamten Systems erfolgt, indem die Klassen gleichzeitig simuliert werden.

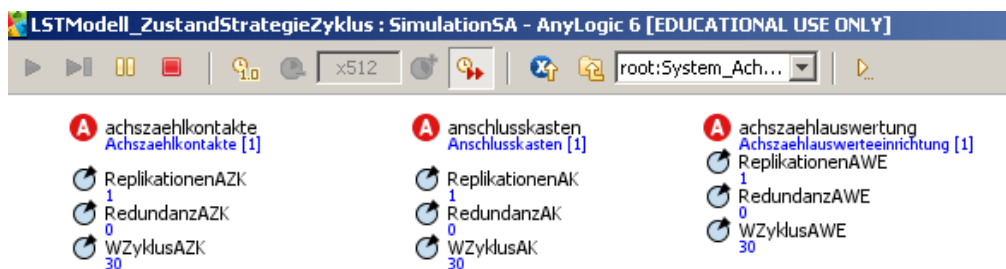


Abbildung 30: Simulationsausschnitt aus AnyLogic®: "System Achszähler", Inspektionsstrategie

Die Hauptaufgabe aller Modelle der LST- Systeme besteht darin, die Instandhaltungskosten und den benötigten Personalbedarf, aus den jeweiligen Komponenten- Klassen aufzusummieren (vgl. Kapitel 4.6). Der System- Personalbedarf, inkl. aller zugehörigen Komponenten wird unverändert pro Woche aufsummiert. Die gesamten Systemkosten setzen sich (vgl. Kapitel 4.2.3) aus der Summe der komponentenspezifischen Instandhaltungskosten zusammen, jedoch verringert um eventuelle Kostenersparnisse (Wegekosten) bzw. erhöht um zusätzlichen Betriebserschwerniskosten bei Systemausfällen. Diese Systemkosten werden

zum einen jährlich⁵⁸ und zum anderen über den gesamten Zeitraum⁵⁹ (25 Jahre, 1200 Wochen) aufsummiert.

Die Modelle unterscheiden sich in der Berechnung der Kostenersparnis. Auf diese Unterschiede wird nun näher eingegangen.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Ersparnisse für die Wegekosten bei der Zeitstrategie und bei der Inspektionsstrategie ist ähnlich. In diesen Modellen wird zu jedem Zeitpunkt, an dem Wartungen von zwei oder mehreren Komponenten ausgelöst werden, die höchsten fixen Kosten (Wegekosten) nur einmal in der Kostenberechnung angesetzt. Die übrigen Wegekosten werden gespart, da man gleichzeitig verschiedene Wartungen, an demselben System und damit dem gleichen Ort durchführt.

Im Gegensatz zu diesen Modellen ist bei der AV- Strategie, die Wahrscheinlichkeit, dass die zustandsabhängigen Wartungen verschiedener Komponenten gleichzeitig ausgelöst werden, weitaus geringer. Aus diesem Grund wird bei dieser zustandsorientierten Instandhaltung (AV) eine Kostenersparnis errechnet, indem auf Systemebene zu jeder Wartung von einer Komponente geprüft wird, ob sich der AV von den anderen Komponenten⁶⁰ maximal im Abstand einer vorher festgelegten Toleranz⁶¹ zu der nächsten komponentenspezifischen AV-Wartungsgrenze befindet. Ist das der Fall, so wird bzw. werden genau zu diesem Zeitpunkt die entsprechende(n) Wartung(en) von einer oder mehreren Komponente(n) ausgelöst. Durch diesen Algorithmus wird gewährleistet, dass die komponentenspezifischen Zustandsgrenzen für die verschiedenen Wartungen erhalten bleiben bzw. nur um maximal 10% verschoben werden können. Infolgedessen wird durch die Verschiebung der AV- Grenzen auf Systemebene die Effektivität dieser Instandhaltungsstrategie aus gesamtheitlicher Sicht gewährleistet, indem wie bei den anderen Modellen, Wegekosten auf diese Art gespart werden können.

⁵⁸ Die jährliche Berechnung der Systemkosten erfolgt auf Grund des besseren Vergleichs mit dem zur Verfügung gestellten Jahresbudget.

⁵⁹ Die Aufsummierung der Systemkosten über den gesamten Modellzeitraum dient als Zielfunktion für die Optimierung der Systeme (Kostenminimierung).

⁶⁰ Eine oder mehrere Komponente(n), dabei Berücksichtigung aller Kombinationsmöglichkeiten (z.B. 4 Komponenten: 16 Kombinationen, welche Komponenten zusammen eine Wartung gleichzeitig haben könnten)

⁶¹ Diese Toleranz wurde hier mit 10% angenommen, diese auch unterschritten werden kann.

4.7 Simulationsergebnisse der Ausgangswerte

Im Folgenden werden die Modelle der verschiedenen Instandhaltungsstrategien auf Komponentenebene und auf Systemebene, am Beispiel der Stromquelle, einander gegenübergestellt. Das Ziel des Vergleiches der Modelle auf Komponentenebene besteht darin, dass die grundsätzlichen strategiespezifischen Merkmale verdeutlicht werden. Dazu wurde ein Simulationslauf, ohne zufällige Ereignisse (Ausfälle) zu Grunde gelegt.

Wie im Kapitel 2.3 erläutert wurde, ist für die Auswahl bzw. Bewertung von Instandhaltungsstrategien die wirtschaftliche, sowie die technischen Betrachtung absolut notwendig. Diese wirtschaftliche Betrachtung, in Form einer Kostenbewertung im Zusammenhang mit der Auswertung der Anzahl der Ausfälle, wird im Kapitel 4.7.2 für alle simulierten LST- Systeme durchgeführt.

4.7.1 Modellvergleich am Beispiel der Komponente „Stromquelle“

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 31 bis Abbildung 33) stellen Auszüge bezüglich des Verlaufs des AV (rechtes Diagramm) und den benötigten Personalwochen (linkes Diagramm), aus den Simulationsläufen⁶² dar. Die verschiedenen Instandhaltungsmodelle basieren auf der Komponente Stromquelle (System: Gleisstromkreis). Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden ausfallfreie Simulationsläufe ausgewählt. In der Abbildung 31 ist die Stromquelle mit der en Zeitstrategie modelliert bzw. simuliert. Darin ist zu erkennen, dass in regelmäßigen Zeitabständen (12 und 24 Monate bzw. 48 und 96 Wochen) Wartungen völlig unabhängig vom Zustand durchgeführt werden. Das hat zur Folge, dass über den gesamten Simulationszeitraum 25 Wartungen durchgeführt werden, die insgesamt Kosten von 4840 € verursachen. Dabei sinkt der Abnutzungsvorrat kaum unter 97%!

Bei den Modellen der zustandsorientierten Instandhaltung wurden die AV- Wartungsgrenzen von 88% und 76% errechnet. Mit der Inspektionsstrategie werden alle 12 Monate (48 Wochen) Inspektionen durchgeführt. Wie jedoch aus der Abbildung 32 hervorgeht, erreicht der AV erst nach 400 Wochen (ca. 8 Jahren) den Wert 88% oder weniger. Bei der Betrachtung der gesamten AV- Kurve über die 1200 Modellzeitwochen ist auffällig, dass der

⁶² Der Verlauf des AV sowie der wöchentliche Personalbedarf werden über die Modellzeit von 1200 Wochen (25Jahre) dargestellt.

AV mit diesem Inspektionszyklus nie die zweite AV- Wartungsgrenze von 76% erreicht, sonder sich immer oberhalb von 80% bewegt. Mit dieser Strategie werden sechs Wartungen des geringsten Umfangs tatsächlich durchgeführt. Damit betragen hier die Gesamtkosten 3440 €. Das ist allein im Vergleich zur Zeitstrategie eine Kostenersparnis von 1400 € (ca. 30%).

Bezüglich des Personalbedarfs dieser beiden Strategien (vgl. Abbildung 31, Abbildung 32), ist nur eine geringe Reduzierung der Personenwochen festzustellen. Als Ursache ist dafür zunächst der Inspektionszyklus zu nennen, der dem kleinsten Wartungszyklus der Zeitstrategie entspricht. Darüber hinaus beträgt die Inspektionsdauer der Dauer des kleinsten Wartungsumfangs, der in diesem Beispiel mit einer Stunde angenommen ist. Somit ist die Häufigkeit des Personaleinsatzes bei beiden Strategien identisch. Unterschiede beschränken sich infolgedessen nur darauf, dass bei dieser zustandsorientierten Instandhaltung auf die Wartungsmaßnahme mit dem größeren Umfang verzichtet wird, da der AV diese untere Wartungsgrenze nicht erreicht.

Wie im Kapitel 4.6.3 erläutert wurde, zeichnet sich die AV- zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie dadurch aus, dass für die Bestimmung des Zustandes keine Inspektionen notwendig sind. Aus diesem Grund können in dem Modell der AV- Strategie weitere Kosten und Personalressourcen gespart werden (vgl. Abbildung 33). Innerhalb dieser 1200 Simulationswochen werden sieben Wartungen mit den kleinsten Umfang durchgeführt. Damit entstehen insgesamt Kosten von 1120 €. Das ergibt eine Kostenersparnis von ca. 76% im Vergleich zur Zeitstrategie und 67% im Vergleich zur Inspektionsstrategie.

Letztendlich liegt der AV der Zeitstrategie am Ende der Modellzeit bei 99% und der AV der Inspektionsstrategie sowie der der zustandsorientierten Instandhaltung nach AV bei 91% (genau 90,8% und 91,1%). Somit beträgt der Unterschied des Abnutzungsvorrates, am Ende der Modellzeit, im Vergleich zwischen der Zeitstrategie und den zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien 8%. Auf Grund der, für diese Modelle getroffenen Annahmen, (Sicherheitsgrenze bei 20% des AVs) ist dieser AV- Unterschied sehr gut vertretbar⁶³. Somit kann man bezüglich der Zeitstrategie auf eine ineffektive und unnötig kostenintensive Instandhaltungsstrategie schließen.

⁶³ Eine Aussage, über die tatsächliche Vertretbarkeit des AV- Unterschiedes kann zum aktuellen Zeitpunkt, auf Grund fehlender Daten (AV- Sicherheitsgrenze für die Komponente „Stromquelle“) nicht getroffen werden.

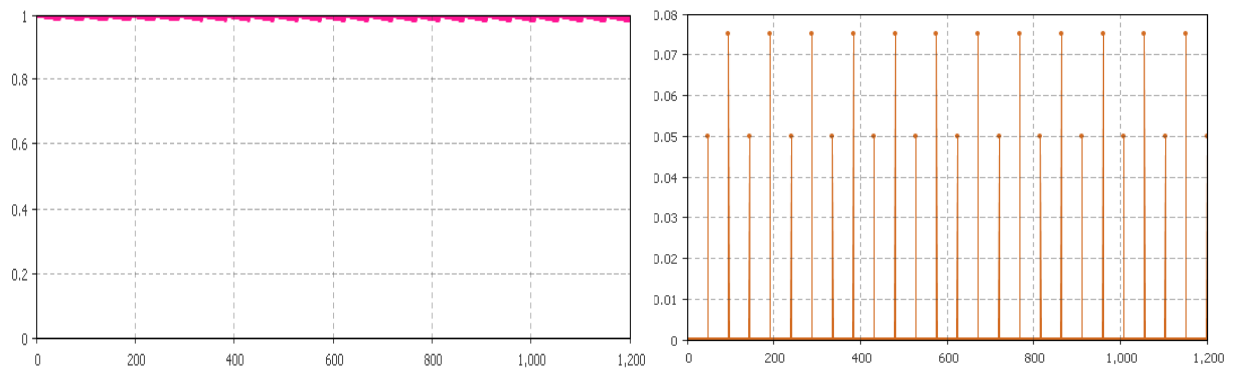


Abbildung 31: Auszug der Simulation der Zeitstrategie

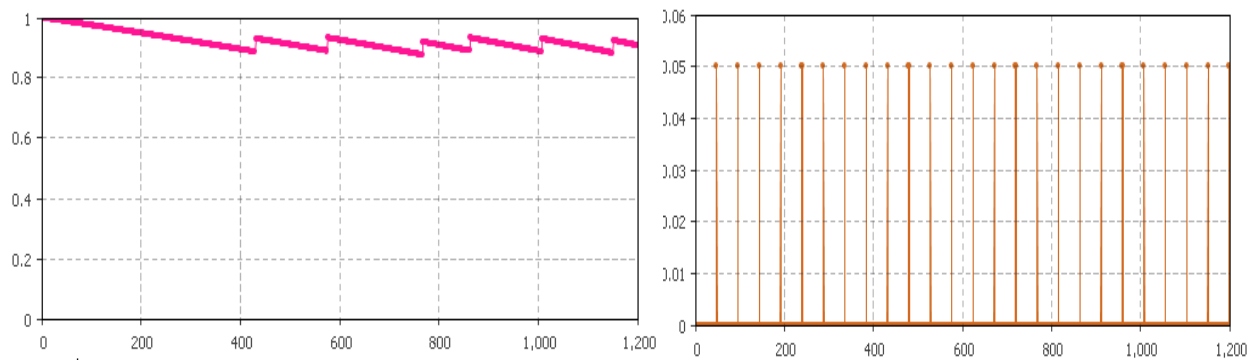


Abbildung 32: Auszug aus der Simulation der Inspektionsstrategie

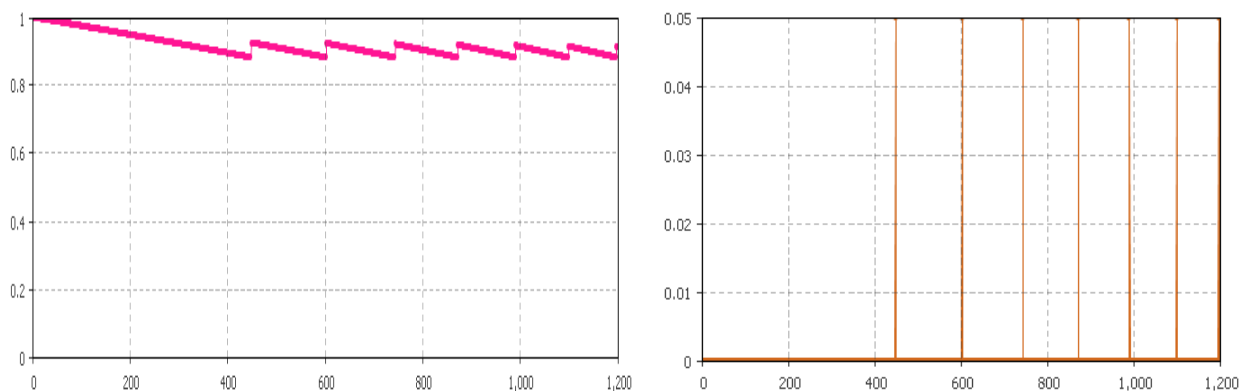


Abbildung 33: Auszug aus der Simulation der AV- Strategie

4.7.2 Modellvergleich auf Systemebene

Wie zuvor im Kapitel 4.3 bezüglich der Vorgehensweise zur Bestimmung von optimalen Instandhaltungsstrategien erläutert wurde, werden die Simulationsdurchläufe zehnfach wiederholt, um die Gefahr, dass die Ergebnisse zu stark von der Zufallsvariable des Ausfalls abhängen, zu verringern.

Aus systemtechnischen Gründen ist es jedoch nicht möglich, mehrere Durchläufe eines Modells automatisch zu realisieren. Somit mussten die Modelle manuell gestartet und nach jedem Durchlauf ausgewertet werden. Mit dem damit verbundenen hohen Zeit- und Arbeitsaufwand musste der Detaillierungsgrad bezüglich der Auswertung der kumulierten Kosten über den gesamten Modellzeitraum und der Anzahl der Systemausfälle eingeschränkt werden. Die in den Diagrammen abgebildeten Werte stellen das arithmetische Mittel über die zehn Simulationsdurchläufe dar.

In der Abbildung 34 sind die Kosten der LST- Systeme aller Instandhaltungsstrategien einander gegenüber gestellt. Hieraus geht eindeutig hervor, dass bei allen Strategien das System des Weichenantriebes, auf Grund der hohen Komplexität, das kostenintensivste System ist. Im Gegensatz dazu stellt das Signal das kostengünstigste LST- System dar. Auffällig ist, dass die zeitorientierte Instandhaltungsstrategie tatsächlich, auch auf der Systemebene, als die kostenintensivste Instandhaltungsstrategie aus dem Modellvergleich hervorgeht.

Im Vergleich zwischen der Zeitstrategie und der Inspektionsstrategie sind die Kostenersparnisse zwischen 1%, bei dem Signal und 20% bei dem Weichenantrieb festzustellen. Deutlich höhere Ersparnisse bietet die AV- Strategie im Vergleich zur Zeitstrategie. Hier beläuft sich die verhältnismäßig geringste Ersparnis auf 31% bei dem Gleisstromkreis. Die Instandhaltungskosten für das Signal könnten mit dieser Strategie um 34% von ca. 13.200 € der Zeitstrategie auf gerundete 8.700 € verringert werden. Darüber hinaus könnten für die Systeme Weichenantrieb und Achszähler sogar die Hälfte der Kosten (45% und 56%) im Vergleich zur zeitorientierten Instandhaltung eingespart werden. Letztendlich zeigen die zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien ein erhebliches Einsparungspotential auf. Dieses beläuft sich bei der Inspektionsstrategie auf durchschnittlich 12% und bei der zustandsorientierten AV- Strategie auf knapp die Hälfte der Kosten (41%)!

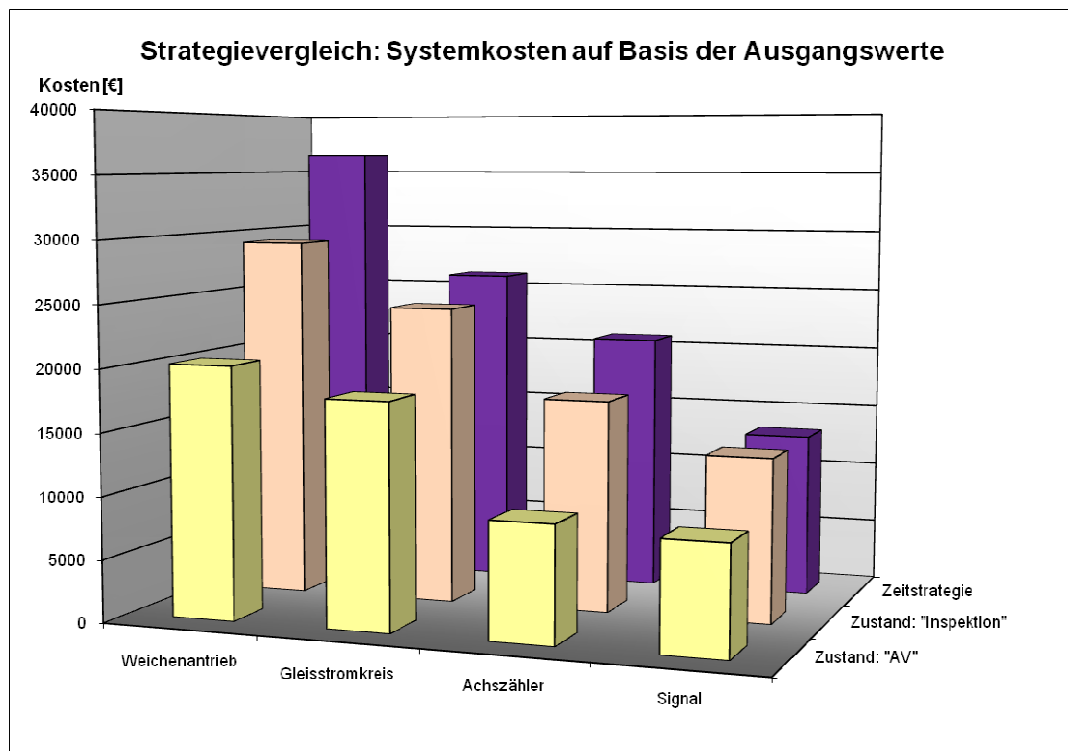


Abbildung 34: Modellvergleich- Systemkosten auf Basis der Ausgangswerte

Bei der Bewertung der Systemausfälle muss berücksichtigt werden, dass die AnyLogic[®] interne Generierung der Ausfälle auf der Exponentialverteilung und der Ausfallrate beruht. Die Ausfallrate wird durch den Zustand (AV) der Komponente (vgl. Kapitel 4.5.3) bestimmt. Der Zustand der Komponenten bestimmt sich bei der AV- Strategie, in Abhängigkeit der gewählten AV- Grenzen und des minimalen Zeitintervalls (vgl. Kapitel 4.6.3). Das bedeutet, dass bei der zustandsorientierten Instandhaltung weniger Wartungen durchgeführt werden als bei der Zeitstrategie, jedoch immer dann, wenn es der Zustand erfordert. Im umgekehrten Fall, bei der Zeitstrategie, kann nicht in jedem Fall mit einer hohen Anzahl der Wartungen ein besserer Zustand im Vergleich zur AV- Strategie garantiert werden. Grund dafür ist, dass die n-te Wartungsmaßnahme (vgl. Abschnitt 4.2.2), die, auf Grund des Alters, nicht die gleiche Zustandsverbesserung hervorruft, wie bei der ersten Durchführung. Demzufolge kann der Zustand⁶⁴ in Abhängigkeit der Wartungszyklen der jeweiligen Komponenten bei der AV- Strategie gleich bzw. sogar besser als bei der Zeitstrategie sein. Das kann man aus der Abbildung 35 erkennen, da die Anzahl der Ausfälle bei dem System Weichenantrieb, bei beiden Strategien gleich ist und darüber hinaus bei den Systemen Gleisstromkreis und Signal die Anzahl der Ausfälle sogar bei der AV- Strategie geringer ist (13% und 30%). Bezüglich

⁶⁴ An dieser Stelle besteht zukünftig Forschungsbedarf, da hier nur mögliche Gründe genannt werden können, jedoch keine tatsächlichen Beweise.

des Achszählers (vgl. Abbildung 35) ist festzustellen, dass mit der zeitbasierten Instandhaltungsstrategie die wenigsten Ausfälle generiert werden (durchschnittlich 2,3 Ausfälle, bei 10 Simulationsläufen). Das lässt auf unangemessene AV- Grenzen und/ oder ein nicht angemessenes minimales Zeitintervall bei der zustandsorientierten AV- Strategie schließen, da bei der AV- Strategie innerhalb dieser Simulationsläufe ca. 17% mehr Ausfälle generiert werden.

Auffällig ist, dass bei der Inspektionsstrategie die Anzahl der Ausfälle generell höher ist als bei der Zeitstrategie und der AV- Strategie. Im Durchschnitt über die vier Systeme werden ca. 14% mehr Ausfälle generiert als bei dem Modell der Zeitstrategie. Das könnte die Ursache haben, dass die Zyklen für die Inspektionen bzw. Wartungen nicht angemessen gewählt sind und demzufolge die Zustände der Komponenten und Systeme geringer sind als die der anderen Instandhaltungsstrategiemodelle. Letztendlich muss bei der Bewertung der Simulationsergebnisse generell die geringe Anzahl der Simulationsläufe (10) und den damit verbundenen wahrscheinlichen Abweichungen berücksichtigt werden.

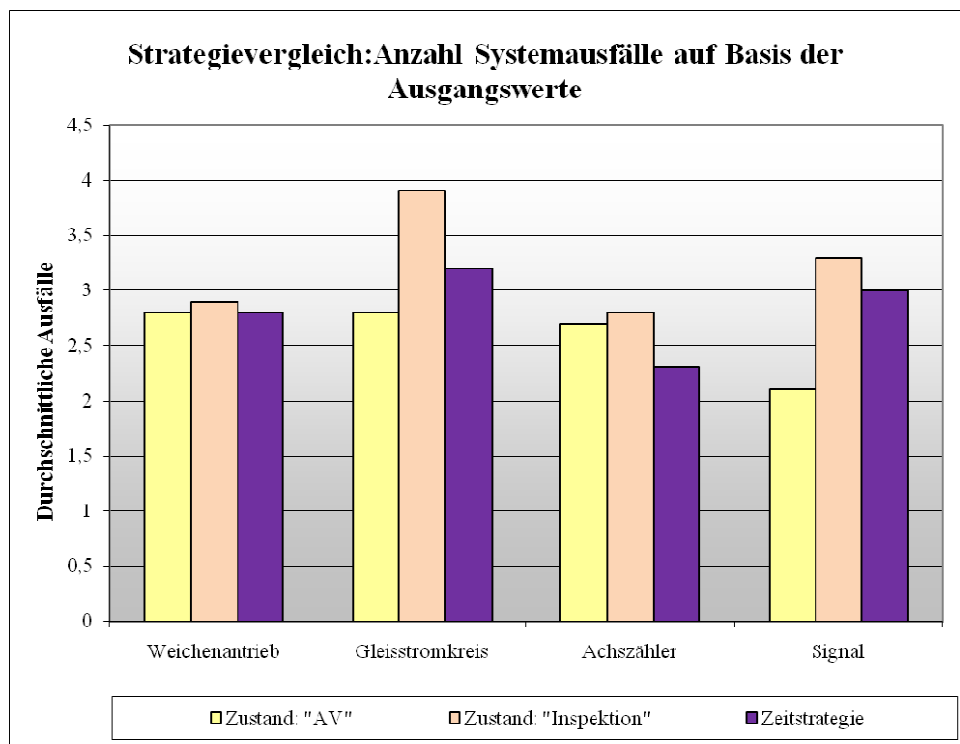


Abbildung 35: Modellvergleich- Anzahl der Systemausfälle auf Basis der Ausgangswerte

4.8 Optimierung der Instandhaltungsmodelle

4.8.1 Ziel der Optimierung und Optimierungskriterien

Die Optimierung der Instandhaltungsmodelle erfolgt für die LST-Systeme der zuvor erläuterten Modelle. Als Grundlage dienen dazu die bereits beschriebenen Ausgangsdaten auf der Komponentenebene⁶⁵. Der Optimierungsalgorithmus wird von AnyLogic® zur Verfügung gestellt. Dazu muss zunächst eine Zielfunktion definiert werden, die in dem Optimierungsprozess minimiert bzw. maximiert werden soll. Diese Zielfunktion ist bei allen LST- Systemen der unterschiedlichen Strategien gleich und besteht aus der Summe der gesamten Systemkosten, über den Zeitraum von 1200 Modellzeitwochen (MW). Diese Zielfunktion soll mit Hilfe der Variation bestimmter Parameter minimiert werden. Die zu variierenden Parameter sind von der Instandhaltungsstrategie und damit der verschiedenen Modellarten abhängig und werden in der Tabelle 3 dargestellt.

Modell: Instandhaltungsstrategie	Zu variierende Parameter	Minimale Grenze	Maximale Grenze	Schrittweite
Zeitstrategie	Wartungszyklen aller Wartungsmaßnahmen	$AW - 4$ [MW]	$AW + 4$ [MW]	1 [MW]
Inspektionsstrategie	Wartungszyklus	$AW - 4$ [MW]	$AW + 4$ [MW]	1 [MW]
AV- Strategie	AV-Grenze	$AW_x - SW_{uG}$	$AW_x + SW_{oG}$	0,1
	Minimales Zeitintervall	4 [MW]	12 [MW]	1[MW]

Tabelle 3: Optimierungsgrenzen der zu variierenden Parameter

MW... Modellzeitwochen

AW...Ausgangswert d. komponentenspezifischen Zyklus bzw. AV- Grenze

SW_{uG} ...Schrittweite, für die untere Grenze:

$$SW_{uG} = (AVG_{x+1} - AVG_{x+2}) * 0,1 \quad (33)$$

SW_{oG} ...Schrittweite, für die obere Grenze:

$$SW_{oG} = (AVG_x - AVG_{x+1}) * 0,1 \quad (34)$$

mit

AVG ...AV- Grenze,

x... Zählvariable bzgl. der Anzahl der Wartungen im Intervall von [1...3]

Die in der Tabelle 3 auftretenden absoluten Werte stützen sich auf Annahmen. Die Tabelle 4 zeigt die Zuordnung der Zählvariable x zu den jeweiligen AV- Grenzen, die für die Formel

⁶⁵ Wie bereits im Kapitel 4.3 erwähnt wurde, musste auf Grund des hohen Zeit- und Arbeitsaufwandes auf die Optimierung der Komponenten verzichtet werden. Alle Optimierungsklassen der Komponenten sind jedoch in den Modellen enthalten.

über die (AV-) Schrittweite Grundlage ist. Mit dieser Berechnung der Optimierungsgrenzen für die AV- Strategie wird ausgeschlossen, dass sich die Bereiche für die Variation der AV- Grenzen überschneiden.

x [1..3]	AVG _x
1	1,0
2	Höchste AV- Grenze (W1)
3	Zweithöchste AV- Grenze (W2)
4	Kleinste AV- Grenze (W3) bzw. wenn keine W3 definiert, dann Sicherheitsgrenze (0,2)
5	Sicherheitsgrenze (0,2)

Tabelle 4: Zuordnung der Zählvariable x zu den AV- Grenzen

Bevor die Optimierung der LST- Systeme gestartet werden kann, ist es notwendig die Anzahl der Iterationen und Replikationen einzugeben. Es wurde einheitlich mit 100 Iterationen und 10 Replikationen gearbeitet. Das bedeutet, dass das Optimierungsergebnis aus 100 verschiedenen Variationsmöglichkeiten resultiert, wobei jede einzelne Parametervariante zehnfach wiederholt wurde, um die Abhängigkeit von dem zufälligen Ereignis des Ausfalls einzuschränken. An dieser Stelle mussten diese Einschränkungen vorgenommen werden, da andernfalls die Zeitdauer und der Rechenaufwand für die Optimierung eines LST – Systems nicht vertretbar hoch gewesen wäre.

Letztendlich kann das Optimierungsergebnis mit diesem Kostenkriterium auch eine entsprechende technische Verfügbarkeit garantieren, da die Kosten für Ausfälle und Entstörungen um ein Vielfaches höher sind als die Inspektions- und Wartungskosten. Demzufolge kann eine Instandhaltungsstrategie, die auf Grund einer zu geringen Anzahl von Wartungen zu häufige Ausfälle verzeichnet, zu Beginn bereits aus Kostensicht, als optimale Strategie ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 2.3.2).

4.8.2 Optimierungsergebnisse versus Simulationsergebnisse auf Basis der Ausgangswerte

Aus der Optimierung der LST- Systeme der drei unterschiedlichen Strategiemodelle, unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Kriterien, resultieren die folgenden Kosten, die in der Abbildung 36 veranschaulicht sind. Insgesamt kann jede Strategie eine Kostenersparnis durch die Optimierungen verzeichnen. Die vergleichsweise höchste Ersparnis von ca. 18% (ca. 15.000 €) der Summe aller Systemkosten im Vergleich zu den Simulationsergebnissen der Ausgangsdaten (vgl. Kapitel 4.7.2), erzielt die zustandsorientierte Inspektionsstrategie. Damit konnten die gesamten Systemkosten mit den optimierten Inspektions- bzw. Wartungszyklen auf ca. 69.000 € gesenkt werden. Die Optimierung der LST- Systeme der AV- Strategie bringt eine Kostenersparnis von ca. 12% (7.000 €) mit sich und reduziert die Instandhaltungskosten von ca. 56.000 € auf rund 49.000 €. Bei der Zeitstrategie erzielen die optimierten Wartungszyklen eine Reduzierung der Instandhaltungskosten der LST- Systeme insgesamt um ca. 10% (10.000 €) auf rund 87.000 €. Damit ist, gleichermaßen wie in der Betrachtung der Ausgangssituation, die Zeitstrategie trotz Optimierung, mit ca. 87.000 € die kostenintensivste Instandhaltungsstrategie und die AV- Strategie mit ca. 49.000 € die kostengünstigste Instandhaltungsstrategie. Nun werden auf Grund dieser großen Differenz (ca. 44%) das Modell der Zeitstrategie, das in diesen Betrachtungen als Referenzmodell gilt, sowie das Modell der idealisierten zustandsorientierten AV- Strategie näher analysiert.

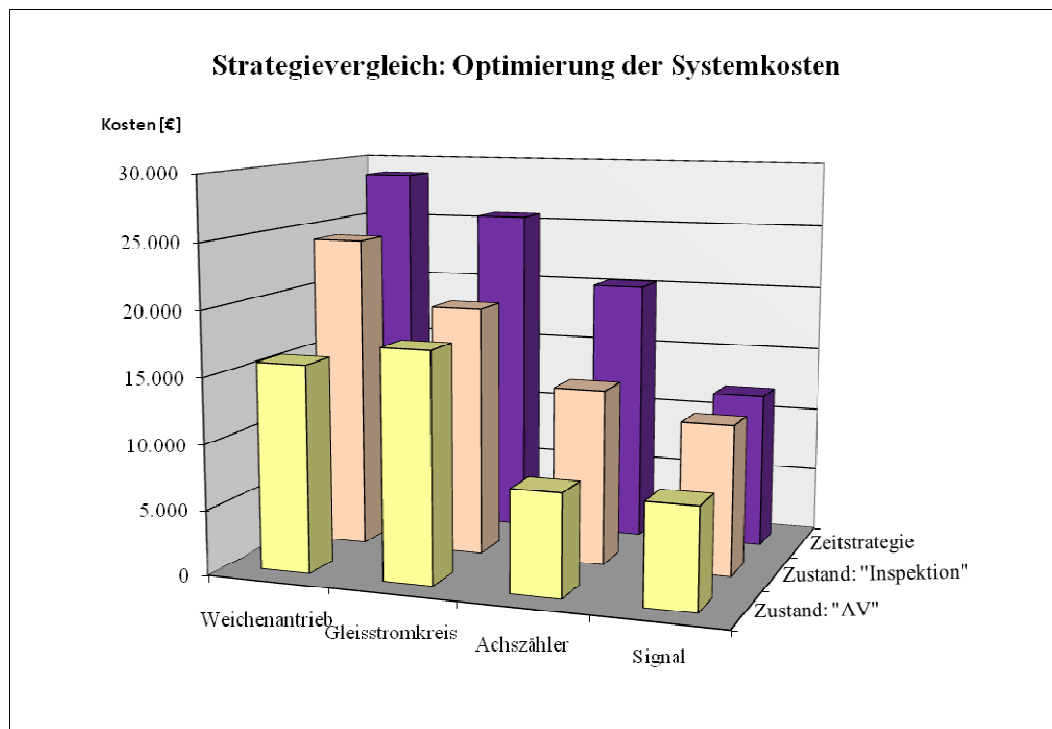


Abbildung 36: Modellvergleich- Optimierungsergebnisse der Systemkosten

Mehr als die Hälfte (60%) der absoluten Kostenersparnis (ca. 7.000 €) wird bei der AV-Strategie durch die Optimierung des Systems Weichenantrieb hervorgerufen (vgl. Abbildung 37). Die verbleibenden 40% der Ersparnisse verteilen sich zu 20% (rund 1.500 €) auf das optimierte System Achszähler und auf die Systeme Signal (14%) und Gleisstromkreis (6%) auf. Wie man aus der Abbildung 37 erkennen kann, macht die Optimierung des Weichenantriebs ebenso bei der Zeitstrategie einen erheblichen Teil (77%) aus. Das Signal ruft, ähnlich wie bei der AV- Strategie, eine Kostenreduktion von 12% hervor. Jedoch ist der absolute Wert der Ersparnis (ca. 1.200 €) größer als bei den Optimierungsergebnissen der zustandsorientierten AV- Strategie. Durch die Optimierung der Systeme Gleisstromkreis und Achszähler werden im Vergleich zu den Simulationsergebnissen der Ausgangswerte 5% und 6% gespart (vgl. Abbildung 37).

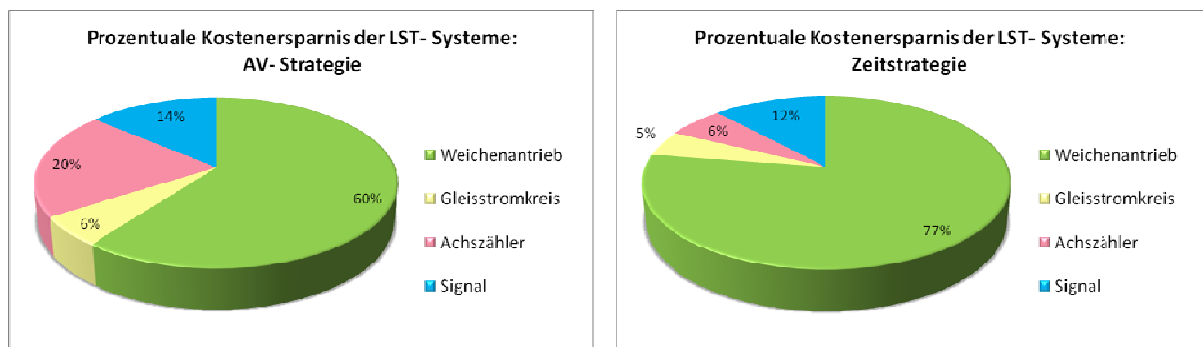


Abbildung 37: Prozentuale Kostenersparnisse der LST- Systeme im Vergleich zur Ausgangssituation

Wie in dem vorherigen Kapitel (vgl. 4.8.1) erläutert, kann, auf Grund der vorher festgelegten Ausgangsdaten, mit Hilfe der Kostenoptimierung gleichzeitig eine gute technische Verfügbarkeit garantiert werden. Das wird in dem nachfolgenden Diagramm, (vgl. Abbildung 38) durch die grafische Darstellung der Anzahl der Systemausfälle, nach dem Optimierungsvorgang der beiden Strategien, verdeutlicht. Dabei ist auffällig, dass ähnlich der Ausgangssituation, drei der vier Systeme deutlich weniger Ausfälle in dem Modell der AV-Strategie aufzeigen, als die Zeitstrategie. Das System Weichenantrieb macht hier eine Ausnahme, da hier im Durchschnitt über 10 Simulationsdurchläufe 0,3 Ausfälle bei der AV-Strategie mehr generiert werden.

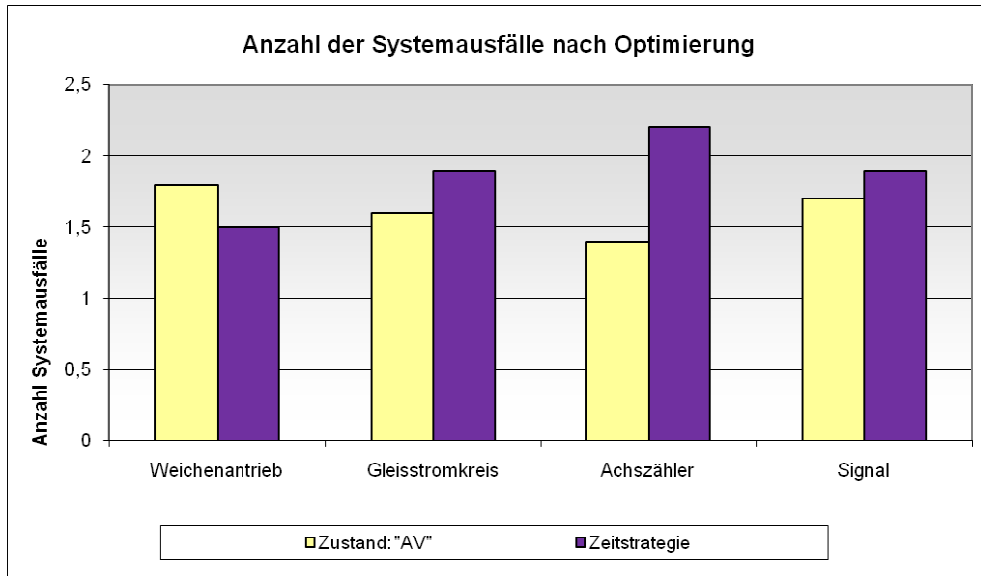


Abbildung 38: Modellvergleich- Systemausfälle nach Optimierung

Die Abbildung 39 zeigt für diese Strategien die prozentuale Verbesserung bezüglich der Systemausfälle im Vergleich zur Ausgangssituation (vgl. Kapitel 4.7.2). Aus der Gegenüberstellung dieser Diagramme geht hervor, dass sich bei beiden Strategien drei der vier Systeme ungefähr um ein Drittel (Schwankungen zwischen 26% und 34%) verbessert haben. Die geringste Reduzierung der Systemausfälle ist bei der AV- Strategie das System Signal, dass nur 10% weniger Ausfälle im Vergleich zur Ausgangssituation generiert. Im Gegensatz dazu beträgt die Reduzierung der Systemausfälle des Signals bei der Zeitstrategie 29% im Vergleich zur Ausgangssituation. Dazu hat sich jedoch die Anzahl der Ausfälle bei dem System Achszähler der Zeitstrategie kaum (3%) geändert (vgl. Abbildung 39).

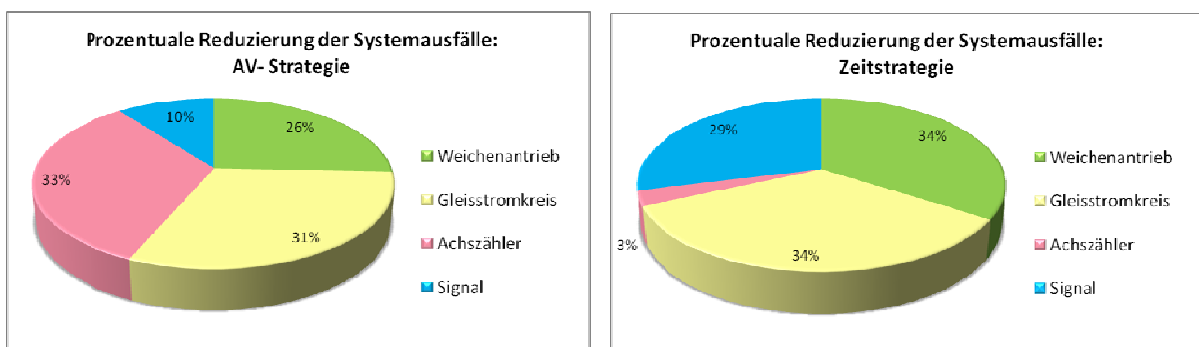


Abbildung 39: Prozentuale Reduzierung der Systemausfälle im Vergleich zur Ausgangssituation

Der Grund, für die geringere Anzahl der Systemausfälle bei der zustandsorientierten AV- Strategie kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht genau spezifiziert werden. Zum einen hat, wie in den vorherigen Kapiteln bereits erläutert, die Reduzierung der wartungsspezifischen AV- Erhöhung einen Einfluss auf die Ausfallrate und somit auf die Generierung des

Ausfallereignisses. Darüber hinaus können auch mögliche Einflüsse aus Softwaresicht bestehen, da aus Gründen des hohen Zeit- und Rechenaufwandes⁶⁶ der Wert für den „fixed time step“ erhöht wurde. An dieser Stelle besteht zukünftiger Forschungsbedarf.

Nachdem nun das Kostenminimum mit Hilfe der Optimierung gefunden wurde, kann zukünftig⁶⁷ ein Wartungsplan auf Basis der strategiespezifischen Informationen (Wartungszyklen; AV- Grenzen; min. Zeitintervall) erstellt werden (vgl. Kapitel 4.8.1). In der Tabelle 5 sind die optimierten Wartungszyklen sowie die Ausgangsdaten der Zeitstrategie dargestellt. Die Tabelle 6 veranschaulicht für die zustandsorientierte AV- Strategie die Optimierungsergebnisse sowie deren Ausgangsdaten.

*...Ausgangsdaten

Wartungsmaßnahmen (Definition nach KoRiL 829.xxxx)	Wartungszyklen [Modellwochen] für Komponenten		
	Gleisrelais	Isolierstöße	Stromquelle
W1 (kleiner Umfang)	25 24*	25 24*	49 48*
W2 (größerer Umfang)	50 48*	49 48*	100 96*

Tabelle 5: Wartungsplan für das System Gleisstromkreis- Zeitstrategie

Wartungsmaßnahmen (Definition nach KoRiL 829.xxxx)	AV- Grenzen [absolut] für Komponenten		
	Gleisrelais	Isolierstöße	Stromquelle
W1 (kleiner Umfang)	0,82 0,80*	0,76 0,73*	0,89 0,88*
W2 (größerer Umfang)	0,62 0,60*	0,49 0,47*	0,77 0,76*
Minimales Zeitintervall [Modellzeitwochen]	10 12*	11 12*	11 12*

Tabelle 6: Wartungsplan für das System Gleisstromkreis- AV- Strategie

⁶⁶ Die Erhöhung des fixed time step verursacht eine Reduzierung der Zeit für die Optimierungsdurchläufe. Dies war notwendig, da anderenfalls ein Optimierungsdurchlauf bis zu 5 Stunden Zeit in Anspruch nahm. Der fixed time step ist ein definierter Zeitschritt für d. Lösen von Differentialgleichungen (Integrale) in AnyLogic.

⁶⁷ Die Erstellung eines Wartungsplans auf Grundlage dieser Simulationsergebnisse ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht empfehlenswert, da die Modelle mit dem Ziel der erstmaligen Abbildung von Instandhaltungsstrategien für Elemente der LST entwickelt wurden. Zukünftig (nach Spezifikationen, Validation der Modelle) soll dies jedoch möglich sein.

4.8.3 Optimale Instandhaltungsstrategie unter Restriktionen auf Netzebene

Nachdem die Optimierungsergebnisse der drei verschiedenen Modelle vorliegen, ist es sinnvoll die Strategien miteinander zu kombinieren, indem für jedes LST- System die kostengünstigste Strategie ausgewählt werden kann. Diese Kombination ist auf Grund der hier getroffenen Annahmen möglich, da die abgebildeten LST- Systeme voneinander unabhängig sind. Jedoch ist, wie aus den Optimierungsergebnissen (vgl. Kapitel 4.8.2) hervorgeht, die AV- Strategie mit Abstand die kostengünstigste Instandhaltungsstrategie. Daher wird hier von der Kombinationen der verschiedenen Modelle abgesehen.

Das Ziel dieser Simulationsmodelle besteht darin, mittels der optimierten Instandhaltungsstrategien vorzeitig Aussagen bezüglich der Instandhaltungskosten und des benötigten Instandhaltungspersonals, über den Zeitraum von 25 (Modellzeit-) Jahren zu treffen. Dazu gilt es zunächst einen Netzabschnitt (vgl. Kapitel 4.2.4) zu bestimmen, für den diese Wartungspläne angewandt werden sollen.

Der zu betrachtende Netzabschnitt umfasst:

- 121 Signale,
- 30 Gleisstromkreise,
- 55 Achszähler und
- 63 Weichenantriebe.

Als nächstes erfolgt die Berechnung der gesamten Systemkosten für diesen Netzabschnitt, durch Multiplikation der LST- Systemkosten mit deren jeweiliger Anzahl. Entsprechend wird auch der wöchentlich benötigte Personalbedarf für dieses Testnetz berechnet. Nachdem die netzspezifischen Systemkosten und der zugehörige Personalbedarf berechnet wurde, gilt es nun zu überprüfen, ob anhand des zur Verfügung stehenden Wartungsbudgets⁶⁸ und des Fachpersonalbestandes die optimale(n) Instandhaltungsstrategie(n) tatsächlich realisierbar⁶⁹ sind. Bei der Deutschen Bahn AG wird ein jährliches Budget für Instandhaltungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt. Um eine vergleichbare Basis zwischen dem Budget und den Instandhaltungskosten zu erzeugen, wurden alle, für das Netz spezifischen Systemkosten, jährlich zu den gesamten Instandhaltungskosten aufaddiert. An dieser Stelle ist es wichtig, die

⁶⁸ Das Wartungsbudget beinhaltet bereits monetär das zur Verfügung stehende Material.

⁶⁹ Alle Restriktionen bzgl. der Modelle stützen sich auf Annahmen.

restlichen Optimierungsergebnisse nicht zu verwerfen (vgl. Kapitel 4.3), da das Optimum, trotz geringsten Gesamtkosten eventuell in einem oder wenigen Jahr(en) ein höheres Budget und damit gleichzeitig mehr Personalressourcen benötigen könnte, als für das Netz zur Verfügung steht. In diesem Fall könnte man beispielsweise für die LST- Systeme eine andere Kombinationsvariante zwischen dem Optimum und der zweitbesten Lösung aus dem Optimierungsprozess bilden (vgl. Kapitel 4.3). Damit würden die Systemkosten steigen, aber gleichermaßen könnten, möglicherweise mit dieser neuen Kombination, die gesamten Netzkosten und damit der Personalbedarf gleichmäßiger verteilt sein und eventuell immer noch unter den Budgetrestriktionen und dem Personalbestand liegen. Diese Kombinationsmöglichkeiten wurden für dieses Netz berechnet, jedoch zeigte sich keine wesentlich gleichmäßigere Kosten- und Personalbedarfsverteilung. Somit basieren die nachfolgenden Berechnungen auf dem jeweiligen LST- Systemoptimum. Entsprechend den „Ausreißern“ in der jährlichen Kostenbetrachtung und bezüglich der Personenwochen zog man hier in Erwägung, für die betreffenden Jahre, eventuelle Rücklagen zu bilden bzw. Personal von anderen Netzabschnitten auszuleihen. Nun wird anschließend, unter Berücksichtigung der Netzrestriktionen, das Referenzmodell (Zeitstrategie) der zustandsorientierten AV- Strategie gegenübergestellt. Es wird sich gleichermaßen wie im Kapitel 4.8.2 auf die Diskussion und Bewertung der Zeitstrategie und der AV- Strategie beschränkt, da hier das Innovations- und Einsparungspotential⁷⁰ am deutlichsten hervorgeht.

In den folgenden Darstellungen (vgl. Abbildung 40, Abbildung 41) sind, ausgehend von der Zeitstrategie und der AV- Strategie, die Systemkosten und die daraus resultierenden jährlichen Netzkosten grafisch veranschaulicht. Bei der Betrachtung der Netzkosten beider Strategien ist auffällig, dass die Kosten der zustandsorientierten Instandhaltung weitaus größeren Schwankungen unterliegen, als die der zeitbasierten Instandhaltung. Diese Schwankungen sind charakteristisch für diese AV- Strategie, da die Instandhaltungen unabhängig von der Zeit durchgeführt werden. So betragen die jährlichen Netzkosten bei der Zeitstrategie, mit Ausnahme des 14. Jahres, durchschnittlich ca. 200.600 € (vgl. Abbildung 40). Der „Ausreißer“ im 14. Jahr kommt durch hohe Ausfallkosten mehrerer Systeme und kostenintensiver Wartungsmaßnahmen bei den Weichenantrieben zu Stande. Nun könnte man auf Grundlage dieser Verteilung⁷¹ mit einer jährlichen Budgetrestriktion von 250.000 € diese

⁷⁰ Dieses Einsparungspotential ist zukünftig noch weiter zu erforschen bzw. zu spezifizieren.

⁷¹ Andere Kombinationen der Optimierungsergebnisse zeigen weder bei der Zeitstrategie noch bei der AV- Strategie eine gleichmäßigere Verteilung der Kosten und damit des Personalbedarfs. Demzufolge wird hier mit den Optimierungsergebnissen gearbeitet.

Instandhaltungsstrategie umsetzen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Vorfeld die Bezahlung der erhöhten Kosten (rund 340.000 €) nach 14 Jahren sichergestellt werden muss. Dafür wäre, wie o.g. eine Möglichkeit, das überschüssige Kapital in den Vorjahren zu sparen. Letztendlich müssten mit dieser Strategie ca. 5,2 Mio. € für diesen Netzabschnitt aufgewandt werden. Mit der jährlichen Budgetrestriktion über 25 (Modellzeit-) Jahre würden insgesamt 6,25 Mio. € für Instandhaltungsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Damit könnten insgesamt 1,05 Mio. € der Instandhaltungskosten gespart und anderweitig im Konzern der DB AG verwandt werden.

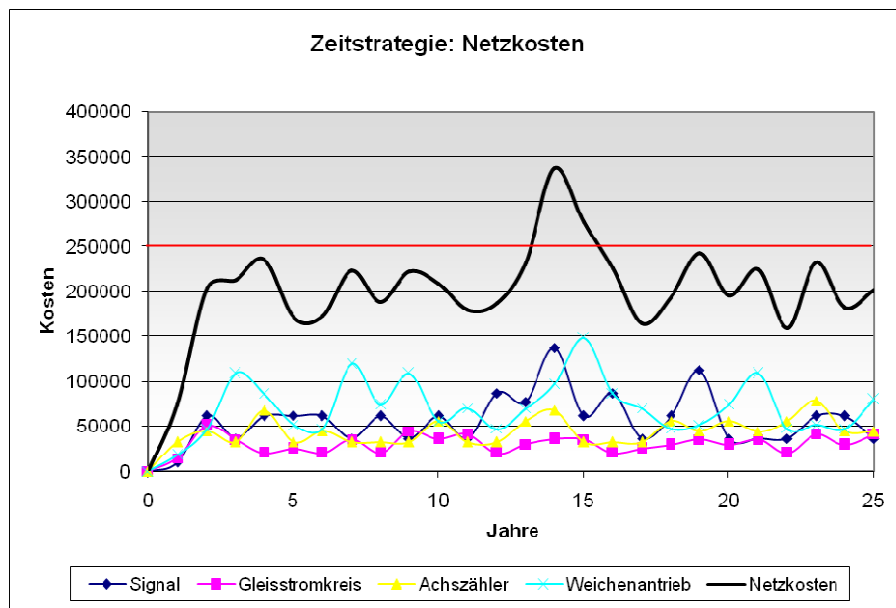


Abbildung 40: Netzkosten basierend auf der Zeitstrategie

Die durchschnittlichen Netzkosten der zustandsorientierten AV- Strategie betragen, ohne Berücksichtigung der drei „Ausreißer“ in dem 15., 20. und 22. Jahr, 110.000 €. In diesem Fall würde eine jährliche Budgetrestriktion von 150.000 € für die Umsetzung dieser Strategie genügen (vgl. Abbildung 42). Hier gilt, wie bei der zeitbasierten Instandhaltung, dass im Vorfeld geklärt werden muss, wie die hohen Kosten nach dem 15., 20. und 22. Jahr bezahlt werden könnten. Dieses Problem könnte ebenfalls mit dem Sparen des zur Verfügung gestellten Budgets gelöst werden. Letztendlich belaufen sich die gesamten Instandhaltungskosten bei der zustandsorientierten AV- Strategie auf ca. 2,9 Mio. €. Mit einer jährlichen Budgetrestriktion von 150.000 € stehen insgesamt über 25 (Modellzeit-) Jahre 3,75 Mio. € zur Verfügung. Somit könnten von diesem Budget insgesamt 850.000 € gespart werden.

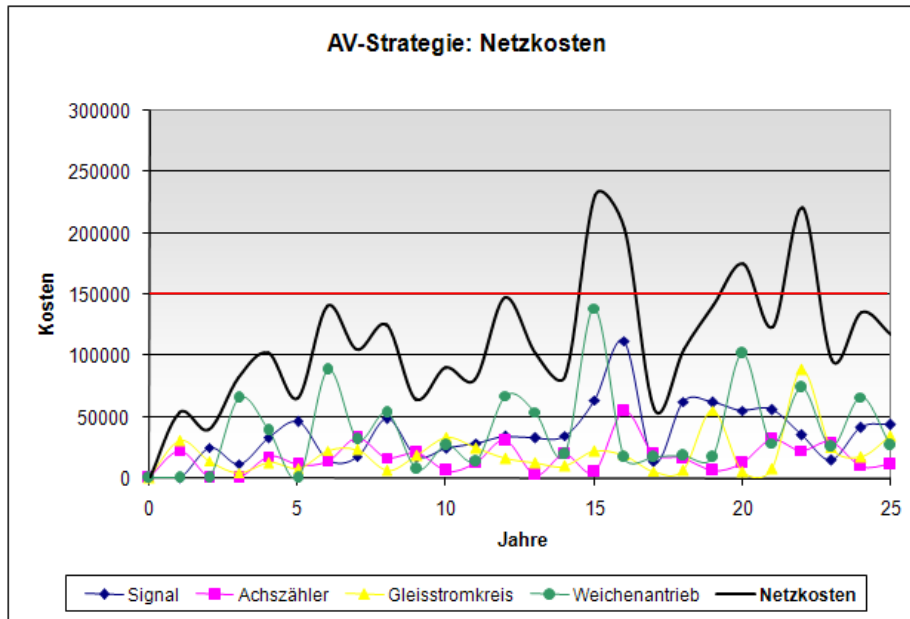


Abbildung 41: Netzkosten basierend auf der AV- Strategie

Im diesem Netzabschnitt könnten 44%, d.h. ca. 2,3 Mio. € der Instandhaltungskosten gespart werden, wenn die Instandhaltungsmaßnahmen zustandsorientiert, mit der AV- Strategie, durchgeführt würden. Demzufolge lassen sich auch die Personalressourcen, wie aus den folgenden Diagrammen (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 43) hervorgeht, um mehr als die Hälfte reduzieren. In der Abbildung 42 erkennt man erneut die, für die Zeitstrategie typische, zeitlich gleichmäßige Durchführung der Wartungsmaßnahmen. Zur Realisierung dieser Instandhaltungsstrategie ist demzufolge ein Personalbedarf von 10 Fachkräften⁷² über den gesamten Zeitraum von 25 (Modellzeit-) Jahren bzw. 1200 (Modellzeit-) Wochen notwendig. Wobei, wie aus der Abbildung 42 hervorgeht, das Problem besteht, dass das gesamte Fachpersonal nicht zu jeder Zeit ausgelastet ist.

⁷² Für die umfangreichsten Instandhaltungsarbeiten wurden rund 9,4 Personenwochen berechnet.

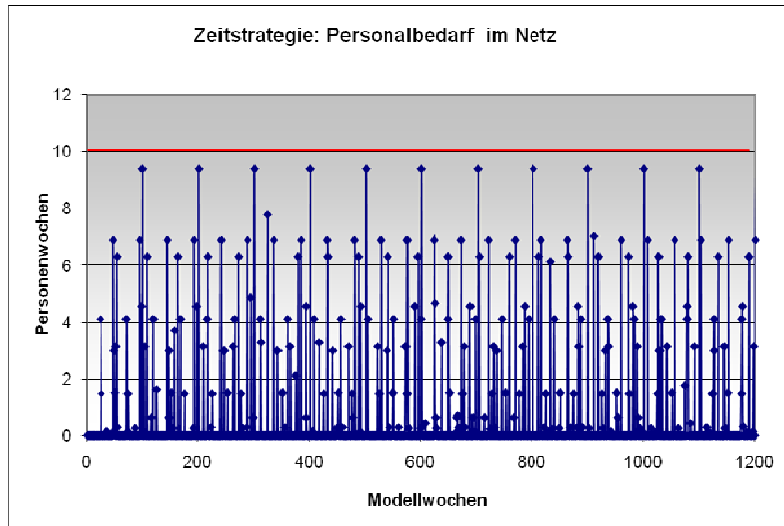


Abbildung 42: Personalbedarf im Netz basierend auf der Zeitstrategie

Die Instandhaltungsarbeiten der AV- Strategie könnten mit 3 Fachkräften realisiert werden. Das wäre eine Personal- Ersparnis von ca. 70%. Jedoch gibt es hier zwei Wochen, in denen mehr als 3 Fachkräfte benötigt werden. Dieses Problem könnte gelöst werden, indem für diese zwei Wochen, Fachkräfte von anderen Netzabschnitten ausgeliehen würde.

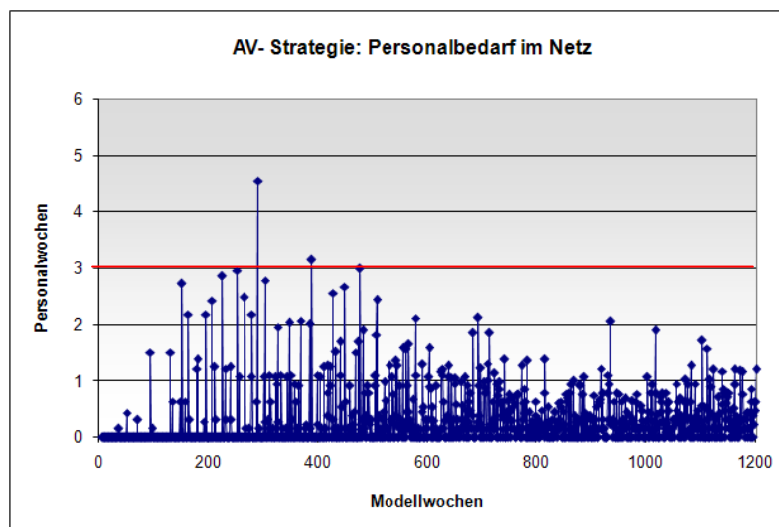


Abbildung 43: Personalbedarf im Netz basierend auf der AV- Strategie

Im Rahmen der getroffenen Annahmen, Einschränkungen und Optimierungskriterien (vgl. Kapitel 4.2, 4.5, 4.8.1) ist die optimale Instandhaltung für diesen Netzabschnitt, auf Grund der geringsten Kosten und des geringsten Personalbedarfs, bei gleich bleibend guter⁷³ technischer Verfügbarkeit, eindeutig die zustandsorientierte AV- Instandhaltungsstrategie.

⁷³ Auf Basis der, in Kapitel 4.8.2 diskutierten Ausfälle, lässt sich schließen, dass die technische Verfügbarkeit der AV- Strategie auch in diesem Netzabschnitt gleich oder höher ist, als die der Zeitstrategie.

4.9 Bewertung und Diskussion der Modelle

Mit der Entwicklung der vorgestellten Simulationsmodelle wurde das übergeordnete Ziel, der erstmaligen Quantifizierung komplexer Zusammenhänge im Bereich Instandhaltungsstrategieplanung, für die Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik realisiert. Die verschiedenen Instandhaltungsmodelle wurden für die bestimmten LST- Komponenten und LST- Systeme abgebildet. Somit stellt dieses Verfahren eine Basis für eine objektiv geprägte Strategiewahl dar. Das wurde im vorherigen Kapitel, verdeutlicht, indem auf Grund der optimierten Simulationsergebnisse, die kostengünstigste⁷⁴ Strategie innerhalb eines Netzabschnittes ausgewählt wurde. Ein weiterer Vorteil dieser Modelle und deren Simulations- und Optimierungsergebnisse besteht, im Rahmen der getroffenen Annahmen, in einer besseren Planungssicherheit⁷⁵ bezüglich der Instandhaltungskosten und des benötigten Personals. Demzufolge hat man die Möglichkeit, bestimmte Engpässe im Voraus festzustellen und frühzeitig, durch das Einleiten entsprechender Maßnahmen, reagieren zu können (vgl. Kapitel 4.8.3).

Aus dem vorherigen Kapitel wird anhand der Simulationsergebnisse, der Umfang möglicher Kostenersparnisse ersichtlich, der eine Umstellung auf eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie, innerhalb eines bestimmten Netzabschnittes bringen könnte. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Ersparnisse nicht als absolut anzusehen sind, da die Simulationsmodelle zu einem großen Teil auf Annahmen bestehen (vgl. Kapitel 4.5). Um genauere Simulations- und Optimierungsergebnisse zu generieren ist eine Verringerung der Annahmen, die den Modellen zu Grunde liegen, notwendig. Die Weiterentwicklung der Simulationsmodelle sollte als erstes in der Abbildung der Ausfallrate mit der Weibullverteilung bestehen, da diese in der Zuverlässigkeitstechnik die beste Annäherung bietet. (Schüppenhauer, 2003 S. 23) Darauf aufbauend kann die Funktion des Abnutzungsvorrates als Integral⁷⁶ der Ausfallrate beschrieben werden. Somit erreicht man eine mathematische Konsistenz und gleichzeitig die Eliminierung der Annahmen über die Alterung, Abnutzung⁷⁷ sowie der Ausfallrate der Komponente. Weiterhin sind genauere Angaben über die MTBF- Werte (mittlere Lebensdauer) der Komponenten erforderlich, die

⁷⁴ Unter Berücksichtigung der Einschränkungen und Annahmen.

⁷⁵ Die Verteilung der Ausfälle kann von den Simulationsergebnissen abweichen. Diese Abweichungen müssen bei der Bestimmung der Budget- und Personalrestriktionen mit eingeplant werden.

⁷⁶ Da die Ausfallrate auf Grundlage der Weibullverteilung nicht integrierbar ist (vgl. Kapitel 4.4.6), könnte die Funktion des Abnutzungsvorrates anhand einer numerischen Approximation bezüglich der Ausfallrate dargestellt werden.

⁷⁷ Die Parameter Alterung und Abnutzung sind für die aktuelle AV- Funktion von Bedeutung (vgl. Kapitel 4.5.2).

direkt vom Hersteller⁷⁸ bezogen werden sollten. Darüber hinaus weisen diese Modelle die folgenden Kritikpunkte auf, mit denen man sich bei der Weiterentwicklung auseinandersetzen sollte.

- Das Datenmaterial beruht zu einem erheblichen Anteil auf Annahmen (AV- Erhöhung nach Wartungen, AV- Wartungsgrenzen, etc.), da es bisher noch keine praktischen Erfahrungen auf dem Gebiet der zustandsorientierten Instandhaltung in der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik gibt. Hier besteht Forschungsbedarf.
- Die Simulationsergebnisse der Zeitstrategie zeigten, dass trotz einer wesentlich höheren Anzahl der Wartungen, oftmals mehr Ausfälle, als bei der zustandsorientierten AV- Strategie (vgl. Kapitel 4.7.2, 4.8.2) generiert wurde. An dieser Stelle besteht zukünftiger Forschungsbedarf, indem die Modelle hinsichtlich Plausibilität zu untersuchen sind. Zum aktuellen Zeitpunkt lässt es sich nicht sofort erschließen, ob bzw. warum dieser Zusammenhang zwischen dem Abnutzungsvorrat (AV- Erhöhungen durch Wartungen) und damit der Ausfallrate und dem Eintritt des Ausfalls tatsächlich besteht. Darüber hinaus gilt es zu klären wie das softwareinterne Event, auf Basis der Exponentialverteilung und der Ausfallrate die Zufallszahlen und damit die Anzahl der Ausfälle genau generiert.
- Es wurde ein idealisierter Zustand vorausgesetzt, der es erlaubt, dass das Instandhaltungspersonal zeitlich flexibel eingesetzt werden kann. Demzufolge fällt modellhaft auch nur während der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen Personalaufwand⁷⁹ an. Darüber hinaus wurden ebenso Feiertage und Urlaubstage nicht mit berücksichtigt.
- Auf Grund des hohen Zeit- und Rechenaufwandes während der Optimierungsdurchläufe, mussten die Optimierungskriterien (z.B. Intervalle für Wartungszyklen), sowie die Iterationen und Replikationen eingeschränkt werden.

An dieser Stelle sind auch einige Kritikpunkte seitens der Software AnyLogic[®] zu nennen, wie beispielsweise:

- Zu hoher Rechen- und Zeitaufwand für Optimierungsdurchläufe,
- Schnittstellenprobleme (Datentransport aus AnyLogic[®] nach MS- Excel) und
- Wenig unterstützende Software- Dokumentation für AnyLogic[®]- Version 6.x

⁷⁸ Da die Herstellerangaben der MTBF- Werte sich nur auf das übergeordnete System beziehen, wurden für diese Modelle die MTBF- Werte für die abgebildeten Komponenten berechnet. (vgl. Kapitel 4.5.1) Dabei mussten jedoch alle anderen nicht dargestellten Komponenten außer Acht gelassen werden.

⁷⁹ Die DB AG hält jedoch immer einen bestimmten Personalstamm für die Instandhaltung bereit, der unabhängig von dem Umfang der Instandhaltungsarbeiten Personalaufwand verursacht.

Für die Bewertung der modellierten Instandhaltungsstrategien spielt die praktische Anwendbarkeit eine entscheidende Rolle. Die Zeitstrategie hat in dieser Hinsicht einen Vorteil, da hier bereits langjährige Erfahrungen bezüglich der Umsetzung der Strategie, bei der DB AG gesammelt wurden. Im Gegensatz dazu, gibt es kaum bzw. keine praktischen Erfahrungen auf dem Gebiet der zustandsorientierten Instandhaltung im Bereich der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik. Für die Praktizierung der zustandsorientierten Instandhaltung sind z.B. Messgeräte und Sensoren notwendig. Bei der Entscheidung der Instandhaltungsstrategie muss demzufolge neben den Kosten, auch die Investitionen⁸⁰ für die Zustandsmessungen berücksichtigt werden. Daraus stellt sich die Frage, für welche Elemente derartige Investitionen rentabel sind. Hierfür bietet der Verlauf des Abnutzungsvorrates⁸¹ eine Orientierungshilfe. Beispielsweise ist abzuwägen, ob eine zeitbasierte oder eine zustandsorientierte Instandhaltung für eine Komponente, mit nahezu linear abfallenden AV, anzuwenden ist. So könnte man hier sehr gut für die Zeitstrategie die Wartungszyklen⁸², in Abhängigkeit des Abnutzungsvorrates, berechnen und anhand des Zeitstrategiemodells optimieren. Somit ist in diesem Fall die Zeitstrategie kostengünstiger als die zustandsorientierte Instandhaltung, da weder Inspektionskosten noch Investitionen, für entsprechende Messtechnik, anfallen.

Jedoch kann der Abnutzungsvorrat nie zu 100% genau abgebildet werden. Aus diesem Grund ist oft die zustandsorientierte Instandhaltung (Inspektions- oder AV-Strategie) eine bessere Alternative, um eine effiziente Ausnutzung des Abnutzungsvorrates einer Komponente zu gewährleisten. Die regelmäßigen Zustandsmessungen ermöglichen eine rechtzeitige Reaktion auf Veränderungen des AV, mittels notwendiger Instandhaltungsmaßnahmen.

Insgesamt betrachtet hat jede modellhaft abgebildete Instandhaltungsstrategie ihre Berechtigung und sollte entsprechend den o.g. Kritikpunkten weiterentwickelt werden. Darüber hinaus besteht in diesem Zusammenhang weiterer Forschungsbedarf in der Abbildung des komponentenspezifischen Abnutzungsvorrates sowie in der Umsetzbarkeit (Verlässlichkeit der Messverfahren) der AV- Strategie und der Inspektionsstrategie⁸³.

⁸⁰ Da die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie kaum bzw. nicht praktiziert wird, können hier keine Angaben zu Preisen der Messtechnik getroffen werden.

⁸¹ Die ungefähre Kenntnis über den Verlauf des Abnutzungsvorrates einer LST- Komponente bzw. System wird vorausgesetzt. (Ergebnis aus weiteren Forschungsmaßnahmen)

⁸² Berechnung der Wartungszyklen erfolgt im Rahmen von Forschungstätigkeiten. (hier keine Berücksichtigung der KoRiL 892.xxxx)

⁸³ Es gibt bereits Ansätze in der Umsetzung der Inspektionsstrategie bei der DB AG, jedoch nicht für alle Komponenten/Systeme. (vgl. Kapitel 3.2)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Instandhaltung, als ein entscheidender Einflussfaktor der Lebenszykluskosten, gewinnt heutzutage zunehmend an Bedeutung. Dies wird besonders im Bereich der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik deutlich, da für die betreffenden Systeme und Komponenten, auf Grund ihrer langen Nutzungsdauer, hohe Instandhaltungskosten anfallen. Um diese Kosten zu reduzieren und gleichzeitig eine angemessene technische Verfügbarkeit der Betrachtungseinheiten zu gewährleisten, müssen im Voraus geeignete Instandhaltungsstrategien ausgewählt werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit, wurden drei verschiedene Instandhaltungsstrategien modellhaft abgebildet. Dabei wurden zunächst die grundlegenden Abhängigkeiten und Zusammenhänge bezüglich des Instandhaltungsprozesses im Bereich der Eisenbahnleit- und -Sicherungstechnik qualitativ, in Form von Kausalmodellen dargestellt. Auf Grund der hohen Komplexität der LST- Systeme auf der einen Seite und der instandhaltungsspezifischen (physikalisch- mathematischen) Zusammenhänge auf der anderen Seite, wurden bestimmte Einschränkungen und Annahmen den Simulationsmodellen zu Grunde gelegt. Damit gelang es die Zeitstrategie, als aktuell von der DB AG angewandte Instandhaltungsstrategie (Ist-Situation) und zwei mögliche Varianten der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien für eine bestimmte Anzahl LST-Komponenten und Systeme zu modellieren und zu simulieren. Auf dieser Basis erfolgten Optimierungen, mit dem Ziel der Minimierung von Instandhaltungskosten. Diese Optimierungsergebnisse lieferten im Rahmen der vorgegebenen Optimierungskriterien, die geringsten Kosten, mit den zugehörigen strategiespezifischen Parametern. Nach Analyse der Simulations- und Optimierungsergebnisse wurde die optimale Instandhaltungsstrategie innerhalb eines Netzabschnittes, unter Berücksichtigung von den jährlichen Budgetrestriktionen und den wöchentlich zur Verfügung stehenden Personal, bestimmt. Aus wirtschaftlicher sowie technischer Sicht und unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Optimierungskriterien, ist für diesen Steckenabschnitt die zustandsorientierte Instandhaltung bezüglich des Abnutzungsvorrates am besten.

Auf dieser Basis gilt es nun diese Modelle, u.a. auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Kritikpunkte, sukzessiv weiterzuentwickeln. Dafür ist ein hoher Forschungsaufwand, vor allem auf dem Gebiet der Zustandsbeschreibung anhand des Abnutzungsvorrates, notwendig. Somit werden innerhalb eines (Test-) Netzabschnittes Felddaten aufgenommen, um das Verhalten der verschiedenen Abnutzungsvorräte quantitativ

zu beschreiben. Da jedoch diese Forschungsarbeiten erst am Anfang stehen, können erst mittel- bis langfristig Aussagen über den tatsächlichen Erfolg der zustandsorientierten Instandhaltungen (AV- Strategie) im Bereich LST getroffen werden.

Die Weiterentwicklung der Instandhaltungsmodelle umfasst mehrere Iterationsschritte. Dabei werden die Modelle, auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse, aus den Untersuchungen des Realsystems, spezifiziert und erweitert. Somit können mittel- bis langfristig, anhand der Simulations- bzw. Optimierungsergebnisse bessere Prognosen bezüglich des Systemverhaltens mit der jeweiligen Instandhaltungsstrategie getroffen werden. Diese Ergebnisse gilt es innerhalb eines bestimmten Netzabschnittes zu validieren. Letztlich soll mit diesen validierten Simulationsmodellen zukünftig möglich sein, die optimale Instandhaltungsstrategie für LST- Systeme innerhalb eines bestimmten Netzabschnittes zu bestimmen.

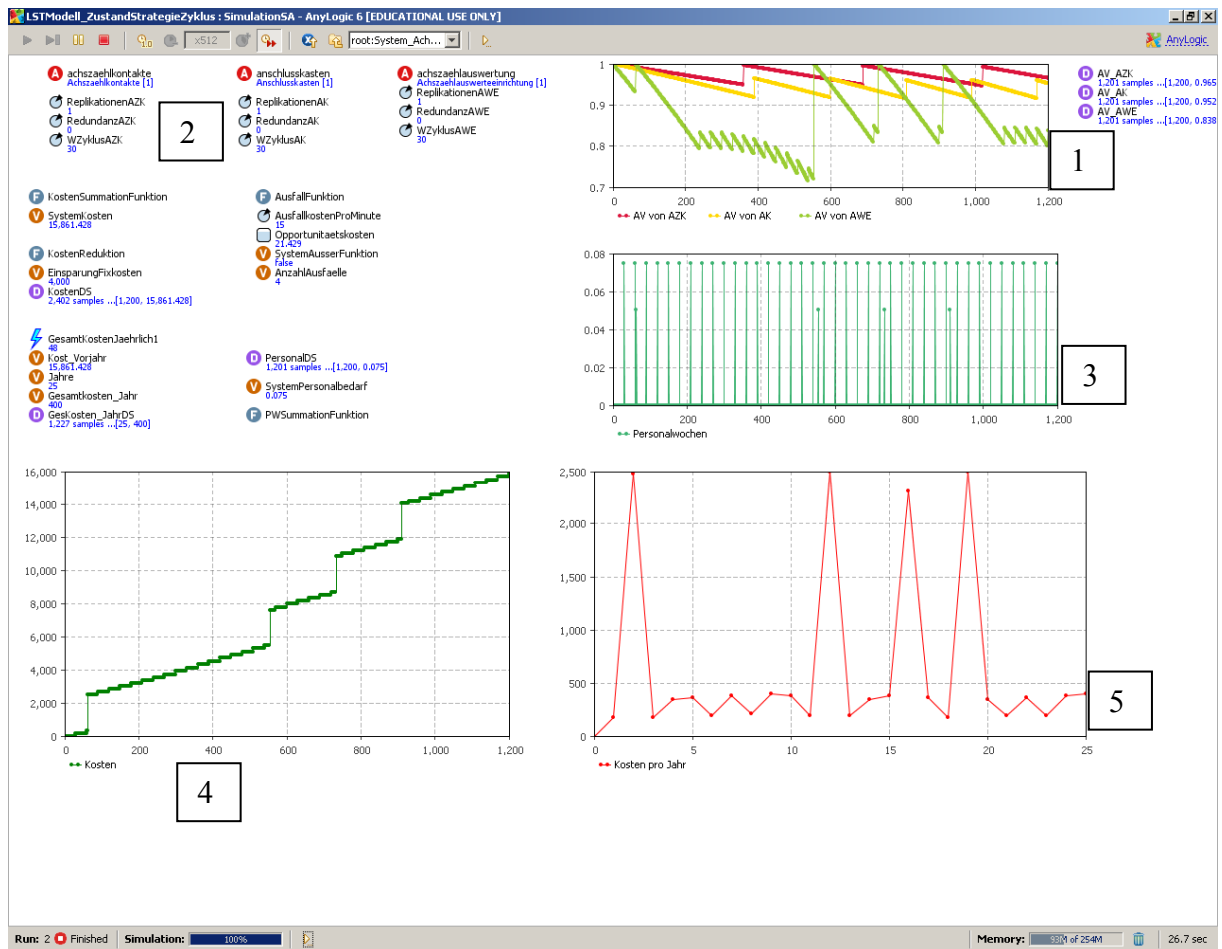


Anhang

- A. 1 Ausschnitt von einem Simulationsmodell eines LST- Systems, am Beispiel „Achsenzähler“ - zustandsorientierte Instandhaltung: „Inspektion
- A. 2 Ausschnitt von einer Optimierung am Beispiel der Komponente⁸⁴ „Anschlusskasten“ – zustandsorientierte Instandhaltung: „Abnutzungsvorrat“

⁸⁴ Wie im Kapitel 4.3 erläutert, erfolgen, auf Grund des hohen Zeitaufwands, für die Auswertungen der Strategiemodelle, keine Optimierungsdurchläufe auf der Komponentenebene. Dennoch sind diese Optimierungsklassen in den Modellen enthalten.

A.1 Ausschnitt von einem Simulationsmodell eines LST- Systems, am Beispiel „Achsenzähler“- zustandsorientierte Instandhaltung: „Inspektion“ (Inspektionsstrategie)

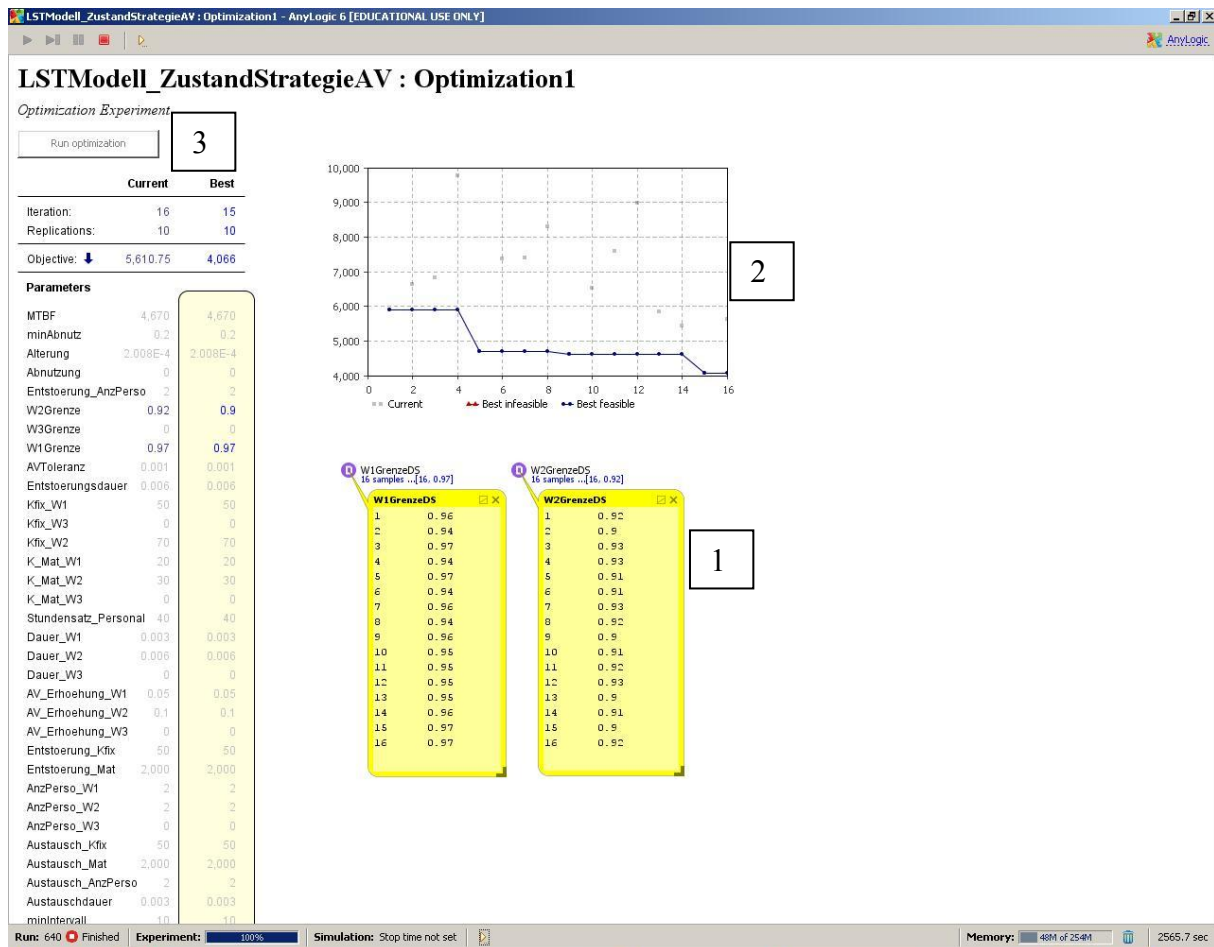


In dem Simulationsausschnitt des LST- Systems „Achsenzähler“ erkennt man (vgl. A1/1, rechts oben) den AV- Verlauf der drei Komponenten (Achsählkontakte, Anschlusskasten, Achsählauswerteeinrichtung). Wie im Kapitel 4.6.4 beschrieben, werden die strategiespezifischen Parameter (hier: Inspektions- bzw. Wartungszyklus „WZyklus“) von der übergeordneten Systemebene an die Komponenten übergeben (vgl. Abbildung A1/2, oben links). Danach werden für jede Komponente die Wartungen ausgelöst (in der Klasse der Komponente) und die entsprechenden Daten an das System übergeben. Hier erfolgt die Addition der Personenwochen (vgl. Abbildung A1/3) sowie die der Instandhaltungskosten über die gesamte Modelllaufzeit (vgl. Abbildung A1/4) und pro Jahr (vgl. Abbildung A1/5).

Abkürzungen der Elemente und ihre Bedeutung

AZK	Achsählkontakte
AK	Anschlusskasten
AWE	Achsählauswerteeinrichtung
Achsählauswertung	Achsählauswerteeinrichtung
PW	Personenwochen

A.2 Ausschnitt von einer Optimierung am Beispiel der Komponente „Anschlusskasten“ – zustandsorientierte Instandhaltung: „Abnutzungsvorrat“ (AV- Strategie)



Die Komponente „Anschlusskasten“ (System: Achsenzähler) hat nach der KoRiL 892.xxxx zwei verschiedene Wartungen, deren Ausgangswerte für die AV- Strategie mit W1Grenze: 0,97 (97%) und W2Grenze: 0,93 (93%) berechnet wurden (vgl. Kapitel 4.6.3). Diese beiden Grenzen wurden innerhalb der Optimierungsgrenzen variiert (vgl. Kapitel 4.8.1). In der Abbildung A2/1 sieht man für jeden Iterationsschritt den zugewiesenen Wert für die jeweilige AV- Grenze („W1Grenze“; „W2Grenze“). Mit dieser Parameterkombination wird das Modell zehnfach simuliert. In dem Diagramm (vgl. Abbildung A2/2) werden dann die durchschnittlichen Kosten, über die 10 Simulationsläufe, als Punkte dargestellt. Die Kosten der aktuellen Iteration werden immer mit dem bisher geringsten Wert verglichen. Als Vergleichshilfe dient eine Verbindungslinie zwischen den bisher geringsten Kosten. In dem dritten Abschnitt des Optimierungsausschnittes sind alle Parameter angezeigt, die bis auf die erste und zweite AV- Grenze konstant bleiben. Darüber hinaus wird die Variante mit den geringsten Kosten unter der Spalte „Best“ gespeichert. Die linke Spalte „Current“ zeigt die aktuellen Werte der Iteration und der Replikation sowie der Kosten („Object“) an.

Literaturverzeichnis

- Meyers Lexikonverlag. 2007.** Redundanz. *Meyers Lexikon*. [Online] Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 27. Februar 2007. [Zitat vom: 31. Januar 2008.] <http://www.lexikon.meyers.de/index.php?title=Redundanz&oldid=152933>.
- Abeln, G., Hartmann, Th. und Pitz, V. 2002.** Zustandsmodell für ein integriertes Instandhaltungsmanagement von 123-kV-Leistungsschaltern. *FGH / ETG-Fachtagung, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*. Berlin : Poster-Session, 2002. Poster 1.18.
- Abernethy, Robert B. 2003.** *The new Weibull Handbook*. North Palm Beach, Florida : Albernethy, 2003.
- Adam, Sarwat. 1989.** *Optimierung der Anlageninstandhaltung: Verfügbarkeitsanforderung, Ausfallfolgekosten und Ausfallverhalten als Bestimmungsgrößen wirtschaftlich sinnvoller Instandhaltungsstrategien*. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 1989.
- Alexandrovitch, Kaverynsky Sergiy. 2002.** *Zustandsorientierte Instandhaltung und Teleservice für Schüttgut- Materialflusssysteme*. Magdeburg : Fakultät Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2002.
- Bandow, Gerhard. 2006.** *Forum Visoin Instandhaltung: Strategien zur Umsetzung moderner Instandhaltungskonzepte in die Praxis*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2006.
- Baum, A. und Rosenbrock, S. 1993.** *Entwicklung eines EDV-unterstützten Verfahrens zur Bestimmung von geeigneten Instandhaltungsstrategien*. Aachen : Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen, 1993.
- Bundesministerium der Finanzen. 2000.** AfA- Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter ("AV"). *Bundesministerium der Finanzen*. [Online] 15. Dezember 2000. [Zitat vom: 1. Dezember 2007.] http://www.disque.de/ra/info/stn_afatabelle.pdf.
- Cardeneo, Andreas. 2005.** *Modellierung und Optimierung des B2C-Tourenplanungsproblems mit alternativen Lieferorten und -zeiten*. Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- DB Netz AG. 2006.** *Mobile Lösungen zur Unterstützung der Instandhaltung bei Schieneninfrastrukturdienstleistern*. Frankfurt am Main : DB Netz AG, Frankfurt am Main, 2006.
- DIN 31051: 2003-06, Norm. 2003.** *Grundlagen der Instandhaltung. DIN 31051: 2003-06* Juni 2003. Deutsche Norm.
- DIN EN 60300-3-3, Norm. 2005.** *Zuverlässigkeitsmanagement- Teil3-3: Anwendungsleitfaden- Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004); Deutsche Fassung EN 60300-3-3:2004. Norm DIN EN 60300-3-3* Deutschland, März 2005.
- EI - Eisenbahningenieur (54). Rosemarie Schilling; Lars Lücking. 2003.** Hamburg : Tetzlaff Verlag, 2003, Bd. 5/2003.
- EN 60300-3-3: 2004 D, CENELEC Europäisches Komitee für Elektronische. 2004.** *Zuverlässigkeitsmanagement, Teil 3-3: Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten. EN 60300-3-3:2004 D* Brüssel, September 2004. Deutsche Fassung.
- Färber, Georg. 2007.** TU München- Lehrstuhl für Realzeit- Computersysteme. *Technische Universität München*. [Online] 2007. [Zitat vom: 17. November 2007.] http://www.rcs.ei.tum.de/courses/rsz/index_html/Formelsammlung.
- Fiedler, Joachim. 1999.** *Bahnwesen : Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen*. Düsseldorf : Werner Verlag, 1999.
- Fischer, Klaus. 1984.** *Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstheorie*. Berlin : VEB Verlag für Verkehrswesen, 1984.
- Fleischer, Jürgen und Wawerla, Marc. 2007.** Abschlussbericht Verfügbarkeit im Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen. *Stiftung Industrieforschung*. [Online] 31. März

2007. [Zitat vom: 11. November 2007.] http://www.stiftung-industrieforschung.de/innovationen/pdf/LCC_ViLMA_Abschlussbericht_2007.pdf.
- FM- Beratungs- und Ingenieur Netzwerk.** FM- Beratungs- und Ingenieur Netzwerk. *Instandhaltungsmanagement im Krankenhaus*. [Online] [Zitat vom: 11. November 2007.] http://www.fm-connect.com/downloads/Instandhaltungsmanagement_im_Krankenhaus.doc.
- Fritz, Andreas.** 2001. *Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme*. Stuttgart : WP Druck & Verlag, 2001.
- Grimm, Matthias, Hartwig, Katrin und Meyer zu Hörste, Michael.** 2005-09-19-20. Anforderungen an eine sicherheitsrelevante Ortung im Schienenverkehr. *Grenzenloser Verkehr in einem Grenzenlosen Europa*. Dresden : TU Dresden [Hrsg.] 20. Verkehrswissenschaftliche Tage, Grenzenloser Verkehr in einem Grenzenlosen Europa, 2005-09-19-20.
- Grothus, Horst.** 2006. Null Fehler Management. *Vorbeugende Instandsetzung- Schäden vermeiden, nicht reparieren*. [Online] 7. Dezember 2006. [Zitat vom: 14. Januar 2008.] http://www.grothus.org/bx_Vorbeugende%20Instandhaltung.pdf.
- IAS- Institut für Analytik und Schwachstellenforschung.** IAS- Group. *IAS- Group*. [Online] [Zitat vom: 20. Oktober 2007.] http://www.ias-group.de/domains/ias-group/PDF/handout_optimale_instandhaltung.pdf.
- Jandt, Jürgen.** 1986. *Betriebswirtschaftliche Anlagenerneuerungsplanung bei stochastischer Zuverlässigkeit der Anlagen*. Frankfurt am Main; Bern; New York : Peter Lang, 1986.
- Konzernrichtlinie, DB AG.** 1998- 2006. *LST- Anlagen montieren und instandhalten*. 892.9303.02; 892.9304.01; 892.9305.12; 892.9305.15; 892.9305.16; 892.9305.32; 892.9306.06 1998- 2006.
- Lienau, Cay.** 2006. *Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation*. Hannover : Deutscher Verkehrs -Verlag GmbH | Eurailpress, 2006.
- Loss, Hans-Jürgen.** 1996. *Optimierung von Instandhaltungsstrategien durch rechnerunterstützte Betriebsanalyse und -verarbeitung*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1996.
- Maschek, Ulrich.** 2007. Eisenbahnsicherungstechnik. [Buchverf.] Lothar Fendrich. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin, Heidelberg : Springer- Verlag, 2007.
- Müller, Andreas und Pröchtel, Udo.** 2001. *Neuordnung des Einkaufs der Leit- und Sicherungstechnik im DB AG-Konzern - Vergabestrategien zum Einkauf der Elektronischen Stellwerke, der Signalmark und der Bahnmark*. Hamburg : Tetzlaff, 2001.
- Naumann, Peter und Pachel, Jörn.** 2004. *Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb*. Hamburg : Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, 2004.
- . 2004. *Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb: Fachlexikon*. Hamburg : Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, 2004.
- OptTek Systems, Inc.** OptTek Systems, Inc. 2008. Simulation Optimization. [Online] OptTek Systems, Inc. OptTek Systems, Inc., 2008. [Cited: Februar 18, 2008.] <http://www.opttek.com/simulation.html>.
- Pachel, Jörn.** 2002. *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden : Teubner, 2002.
- Proksch, Rüdiger.** 2002. *Modellbasierte Planung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien am Beispiel einer Serienfertigung mit geringer Variantenzahl*. Heimsheim : Jost-Jetter, 2002.
- Schmidt, Dieter.** 1992. *Strategisches Management komplexer Systeme*. Frankfurt am Main; Bern; New York; Paris : Peter Lang, 1992.
- Schüppenhauer, Lutz.** 2003. *Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen*. Stuttgart : IMA: Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2003.



Siemens. 2006. Siemens AG Transportation Systems. *Weichenantrieb S 700 K: Weichen zuverlässig stellen.* [Online] 2006. [Zitat vom: 24. September 2007.]

http://www.transportation.siemens.com/de/data/pdf/ts_ra/produkte/ds_s700k_de.pdf.

Signal + Draht (93). **Kynast, Peter und Röpke, Bernd. 2001.** Hamburg : Tetzlaff Verlag, 1. Januar 2001, Bd. 1+2.

Signal + Draht (95). **Heimann, Klemens und Poppe, Günther. 2003.** Hamburg : Tetzlaff Verlag, 2003, Bd. 4/2003.

VDMA; IWF und PW - Technische Universität Braunschweig. Simulation von Instandhaltungs- und Ausfallkosten. *Technische Universität Braunschweig.* [Online] [Zitat vom: 29. September 2007.] http://www.prodlog.tu-bs.de/lima_workshop/workshopsession/gruppe3/Simulationsmodell%20Instandhaltungsstrategie.pdf.

Warnecke, H.-J. 1984. *Der Produktionsbetrieb - Eine Industriebetriebslehre für Ingenieure.* Berlin, Heidelberg, New York : s.n., 1984.

Wikipedia. 2008. Wikipedia Eisenbahnweiche. *Wikipedia Eisenbahnweiche.* [Online] 2008. [Zitat vom: 11. Februar 2008.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Eisenbahnweiche>.



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne unerlaubte und nur unter der in der Arbeit angegebenen Literatur angefertigt habe.

Jena, 2008-02-28